



Pro Gradu -tutkielma

Geologia

Maatutkaprofiilien syvyyskalibrointi CMP-luotauksella esimerkkikohteissa Helsingissä ja Hollolassa

Hannu Pinola

2019

Ohjaajat: Emilia Koivisto ja Seija Kultti

HELSINGIN YLIOPISTO
MATEMAATTIS-LUONNONTIETEELLINEN TIEDEKUNTA
GEOTIETEIDEN JA MAANTIETEEN OSASTO

Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty		Laitos/Institution– Department
Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta		Geotieteiden ja maantieteen osasto
Tekijä/Författare – Author		
Hannu Samuli Pinola		
Työn nimi / Arbetets titel – Title		
Maatutkaprofiilien syvyyskalibrointi CMP-luotauksella esimerkkikohteissa Helsingissä ja Hollolassa		
Oppiaine /Läroämne – Subject		
Geologia		
Työn laji/Arbetets art – Level	Aika/Datum – Month and year	Sivumäärä/ Sidoantal – Number of pages
Pro Gradu -tutkielma	12 / 2019	81 + 14 liitettä
<p>Tiivistelmä/Referat – Abstract</p> <p>Tässä tutkimuksessa perehdytään CMP-luotauksen teoriaan ja käytäntöön maatutkaluotausten profiililinjojen syvyyskalibroinnissa. CMP-luotaus on Suomessa harvoin käytetty nopeusanalyysimenetelmä ja tutkimuksessa haluttiin selvittää CMP-luotauksen tuomia mahdollisuuksia. Tutkimuskohteet sijaitsevat Etelä-Suomessa, Helsingissä ja Hollolassa. Tutkimuskohteet valikoitiin toisistaan poikkeavan geologian vuoksi. Patolassa metsässä maakerrokset olivat pääosin moreenia ja kalliomaata. Tattarisuon pohjavesialueella kerroksissa vaihtelivat hiekkaiset ja saviset kerrosrakenteet. Hollolan deltamuodostumalla maakerrokset vaihtelivat karkeasta sorasta hiekkaan. Sekä Tattarisuolla että Hollolassa saatiin myös aineistoa pohjavesikerroksesta. Kohteissa tehtiin sekä profiililuotaukset että CMP-luotaukset. Tutkimuksissa hyödynnettiin Malå:n ja GSSI:n maatutkalalaitteistoja, joita käyttökokemuksen perusteella vertailtiin myös keskenään.</p> <p>CMP-luotauksella saatuja kerrosnopeuksia verrattiin kohteiden referenssiaineistoihin, keskiarvoiseen 0,1 m/ns:n nopeuteen, taulukkoarvoihin sekä Patolassa hyperbelianalyysin tuottamaan tulokseen. Tulokset olivat rohkaisevia, joskin myös poikkeavia arvoja löytyi. Patolassa haasteena oli moreenin ja rikkonaisen kallionpinnan tunnistaminen profiililuotauksista. Tämä aiheutti hajontaa CMP-luotauksella ja muilla referenssiaineistolla saatujen tulosten välillä. Osa tuloksista oli hyvinkin lähellä referenssiaineistoja, mutta moreeni-kallio-rajapinnan tulkinnan haasteellisuuden vuoksi myös huomattavia poikkeamia saatiin. Tattarisuolla tulkinnan haasteena oli monimutkainen kerrosrakenne ja paikoin profiililuotauslinjoja häiritsevät heijasteet. CMP-luotauksen kerrosnopeudet vastasivat hyvin hiekkaisen kerrosten nopeuksia. Lisäksi CMP-luotauksella voitiin varmistaa luotauslinjalla 2 oleva pohjavesikerros ja että luotauslinjalla 1 pohjavettä ei CMP-luotauksella saatujen nopeuksien perusteella ollut. Hollolassa CMP-luotausaineisto kärsi päällisin puolin huomattavasti häiriösignaaleista. Aineiston prosessoinnin jälkeen saadut kerrosnopeudet vastasivat kuitenkin erinomaisesti referenssiaineistojen kerrossyvyyskäyriä. Kahden maatutkalaitteiston ja useamman antennikonfiguraation hyödyntäminen profiililuotauslinjoissa mahdollistivat hyvän luotausresoluution niin matalammilla kuin paksummilla kerrospaksuuksilla. Malå:n ja GSSI:n luotauslaitteistot toimivat pääosin hyvin eikä kumpikaan laitteisto ollut selkeästi toista parempi.</p> <p>Tässä tutkimuksessa saadun kokemuksen perusteella CMP-luotauksella voidaan saada merkittävää hyötyä maatutkalinjojen tulkintaan. Kun CMP-luotauksen heikkoudet osataan tunnistaa ja aineiston tulkitsija omaa riittävän hyvän kokemuksen, voidaan CMP-luotauksen avulla tehdyillä syvyyskalibroinneilla saada luotettavia tuloksia tutkimusalueen kerrospaksuuksista.</p>		
Avainsanat – Nyckelord – Keywords		
CMP-luotaus, Maatutkaluotaus, Syvyyskalibrointi, Nopeusanalyysi, Patola, Tattarisuo, Hollola		
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited		
HELDA - Helsingin yliopiston digitaalinen arkisto		
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information		

Sisällysluettelo

1. JOHDANTO.....	4
2. MAATUTKALUOTAUS JA TEOREETTINEN PERUSTA.....	6
3. MAATUTKALUOTAUKSEN SYVYYSKALIBROINTI JA NOPEUSANALYYSIMENETELMÄT	11
3.1. Taulukkoarvojen käyttö.....	12
3.2. Vertaaminen tunnettuun rajapintaan	14
3.3. Hyperbelianalyysi	15
3.4. Laboratoriokokeet	16
3.5. Transilluminaatiokoe.....	17
3.6. WARR-luotaus	17
3.7. CMP-luotaus.....	18
4. TUTKIMUSALUEET JA AINEISTON KERUU	22
4.1. Käytetyt maatumkalaitteistot.....	23
4.1.1. Geophysical Survey System Inc.	23
4.1.2. Malå Geoscience	26
4.2. Patolan metsä	28
4.2.1. Geologia	29
4.2.2. Maatumkalinjat	30
4.2.3. Referenssiaineistot	30
4.3. Tattarisuon pohjavesialue.....	32
4.3.1. Geologia	33
4.3.2. Maatumkalinjat	33
4.3.3. Referenssiaineistot	34
4.4. Hollolan deltamuodostuma	36
4.4.1. Geologia	37
4.4.2. Maatumkalinjat	37
4.4.3. Referenssiaineistot	37
5. AINEISTON PROSESSOINTI.....	38
5.1. Profiililinjat.....	39
5.2. CMP-linjat	40
5.3. Kerrosmallit.....	41
6. TULOKSET JA TULKINTA.....	42
6.1. Patolan metsä	43

6.1.1. Profiililinja	43
6.1.2. CMP-luotaus.....	45
6.1.3. Kerrosmallit	45
6.1.4. Tulosten tulkinta ja vertaaminen referenssiaineistoihin	48
6.1.5. Pohdintaa kohteen luotauksista.....	49
6.2. Tattarisuon pohjavesialue.....	50
6.2.1. Profiililinjat	50
6.2.2. CMP-luotaus.....	55
6.2.3. Kerrosmallit	56
6.2.4. Tulosten tulkinta ja vertaaminen referenssiaineistoihin	61
6.2.5. Pohdintaa kohteen luotauksista.....	63
6.3. Hollolan deltamuodostuma	64
6.3.1. Profiililinjat	64
6.3.2. CMP-luotaus.....	68
6.3.3. Kerrosmallit	69
6.3.4. Tulosten tulkinta ja vertaaminen referenssiaineistoihin	74
6.3.5. Pohdintaa kohteen luotauksista.....	75
6.4. Laitteistojen vertailu.....	76
7. JOHTOPÄÄTÖKSET.....	77
8. KIITOKSET.....	79
9. VIITELUETTELO	80
LIITTEET	82

1. JOHDANTO

Maatutkaluotaus on geofysikaalinen tutkimusmenetelmä, jolla saadaan tietoa maankamaran kerrosrakenteista. Maatutkan ehdoton etu on sen mahdollistama pintaa rikkomaton tutkimustyö. Maatutkan toimintaperiaate on pääpiirteissään yksinkertainen, eikä maatutkan käyttö välttämättä vaadi käyttäjältä syvällisempää tietämystä. Käyttäjän tietotaito ja kokemus korostuvat aineiston prosessointi- ja tulkintavaiheessa.

Maatutkan kehitys on tapahtunut nopeasti viimeisen 100 vuoden aikana. Ensimmäiset maatutkakokeilut tehtiin 1920-luvulla (Stern 1930, Hännisen 1991 mukaan) ja vuoteen 1965 asti maatutkaluotausta hyödynnettiin lähinnä jäätiköillä tehtyihin tutkimuksiin (Annan 2002). 1970-luvulle tultaessa maatutkaluotausta pystyttiin hyödyntämään yhä enemmän erilaisiin sovellutuksiin ja laitteistojen saatavuus parani (Annan 2002). Vuosien saatossa maatutkalaitteistot ovat yksinkertaistuneet ja pienentyneet, antennien ominaisuudet parantuneet sekä automaatio on kasvanut (Annan 2002). Maatutkan käyttömahdollisuudet ovat laajentuneet, eikä maatutkaa nimensä mukaisesti enää käytetä pelkästään maakerrosten luotaamiseen (Annan 2005). Suomessa maatutkaa alettiin hyödyntää tutkimuksessa 1980-luvulla, kun Geologinen tutkimuskeskus otti menetelmän käyttöön (Hänninen 1991). Suomessa maatutkaa hyödynnetään paljon pohjavesitutkimuksissa, rakentamisessa ja turvekartoituksessa (esim. Hänninen 1991 ja Öster 2006). Suomessa maatutkaluotausta tekevät tutkimuslaitokset, korkeakoulut, yksityiset maatutkayritykset sekä puolustusvoimat (Öster 2006).

Maatutkaluotauksessa oleellisessa osassa on luodatus profiililinjan prosessointi (esim. Neal 2004). Maatutkalaitteistosta riippuen prosessointia voidaan tehdä osittain jo kenttäolosuhteissa, mutta suurin osa prosessointityöstä tapahtuu jälkikäteen tietokoneella signaalinkäsittelyohjelmia hyödyntäen. Maatutkaluotauksessa aineiston syvyyskalibrointi on tärkeä osa aineiston prosessointia (Neal 2004). Syvyyskalibroinnin tarkoituksena on muuntaa maatutkalaitteistolla mitatut maankamaran rajapinnoilta heijastuneiden aaltojen paluusignaalien saapumisajat vastaamaan rajapintojen todellista syvyystietoa. Tähän vaaditaan tietoa radioaallon kulkunopeuksista luodatuissa maakerroksissa. Tätä kulkunopeuksien määrittystä kutsutaan nopeusanalyysiksi ja sitä voidaan tehdä usein eri tavoin (esim. Conyers 2013 ja Jacob ja Urban 2015).

Tässä työssä perehdytään eri nopeusanalyysimenetelmiin ja erityisesti CMP-menetelmän (Common Mid Point) käyttöön syvyyskalibroinnissa. CMP-luotauksessa tehdään toistuvia mittauksia samasta tutkimuspisteestä. Mittausten välissä antennin lähetintä ja vastaanotinta siirretään tasamatka kauemmas toisistaan (esim. Neal 2004). CMP-luotaus perustuu mittausetäisyyden, toisin sanoen lähettimen ja vastaanottimen etäisyyteen mittauspisteestä, ja edestakaisen radioaallon kulkuajan muutokseen syvyyden pysyessä vakiona. CMP-luotauksia käytetään maailmalla yleisesti, mutta Suomessa CMP-luotauksen käytöstä ei ole montaa mainintaa kirjallisuudessa. Hänninen (1991) on GTK:n tutkimusraportissa selvittänyt CMP-luotauksen perusteita ja Loviisassa menetelmää on hyödynnetty ydinjätteen loppusijoitustutkimuksissa (Sutinen 1997). Onnistuessaan CMP-luotaus mahdollistaa tarkan empiirisen syvyyskalibroinnin ilman että maan pintaa täytyy rikkoa esimerkiksi referenssikairausten vuoksi.

Tässä työssä tarkoituksena on perehtyä CMP-luotaukseen ja testata menetelmää käytännössä kolmessa kohteessa, Helsingissä sekä Hollolassa. Helsingissä kohteet sijaitsivat Patolan metsässä sekä Tattarinsuon pohjavesialueella. Hollolan tutkauskohde sijaitsi Kukonkoivun soranottoalueella. Kohteet poikkeavat toisistaan maaperän, kerrospaksuuksien sekä muodostumistavan mukaan. Patolassa kerrospaksuudet ovat pieniä ja päämaalaji on moreenia. Tattarisuolla kerrokset vaihtelevat karkeammasta hienompiin hiekkakerroksiin ja oman lisänsä tuovat savilinssit ja pohjavesi. Hollolassa puolestaan on huomattavasti suuremmat kerrospaksuudet ja tyypillinen deltan kerrosrakenne. Hollolassa maa-aines vaihtelee karkeasta sorasta hiekkaan.

Tässä työssä käsitellään ensin maatutkasignaalien kulkuun vaikuttavia periaatteita, minkä pohjalta siirrytään itse syvyyskalibrointiin ja eri nopeusanalyysimenetelmiin. Yleisimpien nopeusanalyysimenetelmien pääperiaatteet käydään lyhyesti läpi ja perehdytään niiden käyttökelpoisuuteen eri tilanteissa. Tämän työn tärkein tavoite on perehtyä CMP-nopeusanalyysimenetelmän käyttöön ja saada käyttökokemusta esimerkkikohteiden kautta. Esimerkkikohteissa tehtiin sekä jatkuvat maatutkaprofiilit että CMP-luotaukset. Näistä esimerkkikohteista saatuja tuloksia verrataan kunkin alueen olemassa oleviin referenssimateriaaleihin sekä muilla kuin CMP-menetelmällä saatuihin nopeusanalyysituloksiin. Tutkauksissa käytettiin Malån (www.guidelinegeo.com) ja GSSI:n (www.geophysical.com) maatutkalaitteistoja. Kummankin laitevalmistajan ominaisuuksia käydään läpi omassa osiossaan, sekä tehdään käyttökokemukseen pohjautuvaa vertailua laitteistojen välillä. Johtopäätöksissä keskitytään CMP-menetelmän mahdollistamiin etuihin ja myöskin tilanteisiin, joissa CMP-

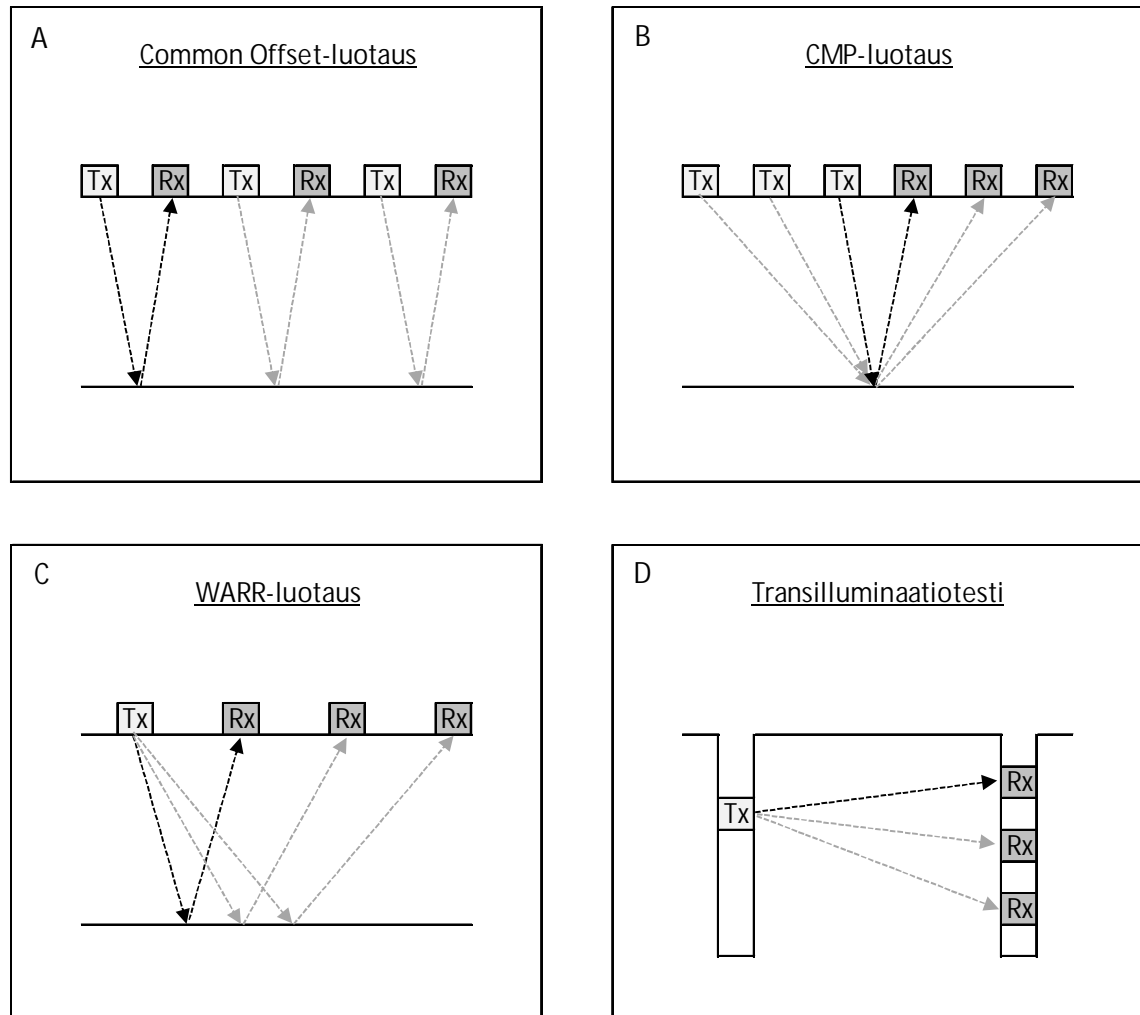
menetelmä ei ole luotettava nopeusanalyysimenetelmä. Lisäksi vertaillaan CMP-luotauksella saatuja tuloksia kohdealueiden referenssiaineistoihin sekä olemassa oleviin taulukkoarvoihin.

2. MAATUTKALUOTAUS JA TEOREETTINEN PERUSTA

Maatutkaluotaus on sähkömagneettinen geofysikaalinen tutkimusmenetelmä. Sillä saadaan maanpintaa rikkomatta tietoa maaperän kerrosrakenteesta (esim. Hänninen 1991). Maatutkan peruserä on melko yksinkertainen. Maatutkaluotauksessa lähetetään radiotaajuudella sähkömagneettisia lyhyitä pulsseja ja vastaanottimella rekisteröidään maankamaraan rajapinnoilta heijastuneiden, vaimentuneiden vasteaaltojen kulkemia kahdensuuntaisia kulkuaikoja ja amplitudeja (Neal 2004). Maatutkaa liikuttaessa nopeasti toistuvat pulssit ja paluuaaltojen rekisteröinnit muutetaan vastaamaan jatkuvaa profiilia, joka ilmentää väliaineessa tapahtuvia sähköisiä muutoksia (Neal 2004). Maatutkalaitteisto koostuu keskusyksiköstä, antennista, näytöstä sekä erinäisistä johdoista ja muista varusteista. Laitteistojen yksityiskohdat poikkeavat hieman valmistajasta riippuen.

Maatutkaluotaus voidaan toteuttaa neljällä tavalla (Kuva 1) (esim. Neal 2004 ja Annan 2005). Yleisin luotautapa on jatkuva profiililuotaus (Common Offset, CO), jossa maatutkalaitteistoa liikutetaan kokonaisuudessaan luodattavan kohteen yli (Kuva 1A) lähettimen ja vastaanottimen välisen etäisyyden pysyessä samana (Neal 2004). Tällöin luotautuloksena saadaan jatkuva profiililinja maan kerrosrakenteesta. Toinen tapa suorittaa luotauksia on CMP-luotaus (Common Mid Point), jota toisinaan kutsutaan myös CDP-luotaukseksi (Common Depth Point), missä sekä antenni että vastaanotin siirtyvät jokaisen mittauksen jälkeen tasamatkan kauemmas mittauksen keskipisteestä (Kuva 1B) (Neal 2004). CMP-luotautusta käytetään selvittäessä maaperän nopeusprofiilia (esim. Conyers 2013). Kolmas mittaustapa on WARR-luotaus (Wide Angle Reflection and Refraction), joka on jokseenkin samantapainen kuin CMP-luotaus. Poiketen edellisestä, WARR-luotaus (Wide Angle Reflection and Refraction) mittaus suoritetaan joko liikuttaen ainoastaan vastaanotinta (Common Source, CS) tai lähetintä (Common Receiver, CR) kauemmas vastaparistaan (Kuva 1C) (Conyers 2013). CS- ja CR-luotauksella saadaan niin ikään tietoa maaperän nopeusprofiilista. Neljäntenä mittaustapana voidaan pitää kairareikäluotautusta (Borehole Survey, Transilluminaatiotesti). Kairareikäluotauksessa antennin lähetinosa sijoitetaan yhteen kairareikään ja vastaanotin toiseen (Kuva 1D). Luotauksen ajatuksena on saada tietoa lähettimen ja vastaanottimen väliin jäävän aineksen koostumusta ja myöskin määrittää

nopeusprofiili (Annan 2005). Poiketen muista luotausmenetelmistä kairareikäluotauksessa tarkastellaan ainoastaan radioaallon yhteen suuntaan kulkemaa aikaa (Annan 2005).



Kuva 1. Maatutkamittausten luotauskonfiguraatiot. (A) Tavanomainen profiililuotaus. (B) CMP-luotauksen perusperiaate. (C) WARR-luotauksen toimintaperiaatteen Common Source-luotauksen tapauksessa. (D) Transilluminaatiotestin periaate kairareikäutkimuksissa. Kuvissa lähettimestä (Tx) lähetetään nuolen osoittamaan suuntaan signaali ja rajapinnalta heijastunut signaali rekisteröidään vastaanottimessa (Rx). Kairareikäluotauksessa lähettimen signaali kulkee suoraan väliaineen kautta vastaanottiin.

Maatutkaluotauksessa keskeisessä roolissa on käytetty antenni. Antennin keskitaajuus määrittää mahdollisen erotuskyvyn luotaukselle (Neal 2004). Korkeataajuisilla antenneilla vertikaalinen erotuskyky on parempi kuin matalataajuisemmillä antenneilla. Matalataajuisilla antenneilla puolestaan saavutettu syvyysulottuvuus on parempi (esim. Hänninen 1991). Antennien koossa on myös huomattavaa vaihtelua. Yleisesti ottaen korkeataajuiset antennit ovat kooltaan pienempiä kuin matalataajuiset. Antennit voidaan myös jakaa kahteen ryhmään: maavasteantennit ja

ilmavasteantennit (esim. Saarenketo 2006). Maavasteantennilla tarkoitetaan antennia, joka mittausta suorittaessa pidetään aivan maanpinnan läheisyydessä tarkimman luotaustuloksen saamiseksi. Maavasteantennit ovat yleisimmin luonnontieteissä käytetty antenniryhmä. Ilmavasteantennit puolestaan toimivat paremmin, kun antennin ja luodattavan kohteen väliin jää suurempi tyhjä tila. Ilmavasteantenneja käytetään esimerkiksi teiden ja junaratojen tutkimuksissa (Saarenketo 2006). Ilmavasteantenneja voidaan käyttää jopa 80 km/h vauhdista (esim. Saarenketo 2006). Lisäksi antennit voidaan jakaa suojattuihin ja suojaamattomiin antenneihin (esim. Robinson et al. 2013). Suojatun antennin ideana on suodattaa häiritseviä signaaleja, jolloin jäljelle jää vain tutkimuksen kannalta oleelliset signaalit. Antennin suojauksen varjopuolena on antennin koon kasvaminen, mahdolliset suojauksesta aiheutuvat häiriösignaalit sekä huonompi syvyysulottuvuus verrattuna suojaamattomiin antenneihin (Jol 2008). Suojatusta antennista on eniten hyötyä rakennetuissa ympäristöissä, joissa on paljon maanpäällisiä häiriösignaaleja. Antennin suojaus ei kuitenkaan välttämättä suodata kaikkia virhesignaaleja (Robinson et al. 2013). Suojaamattomat antennit soveltuvat puolestaan paremmin maastoihin, jossa tarvitaan maksimaalista syvyysulottuvuutta ja hankalissa maastoissa liikuteltavaa antennia.

Suotuisissa oloissa maatutkalla voidaan saada tietoa jopa 30–50 metrin syvyydeltä (Hänninen 1991). Jotta päästään näin syvälle, täytyy luodattavan väliaineen olla suotuisa radioaallon etenemiselle. Merkittävin yksittäinen radioaallon kulkuun vaikuttava tekijä on maakerrosten vesipitoisuuden ja tyhjän huokostilan vaihtelu (Hänninen 1991). Lisäksi maa-aineksen raekoolla ja vähäisissä määrin maaperän mineraalikoostumuksella on vaikutusta radioaallon kulkuun (Hänninen 1991 ja Igel et al. 2012). Maatutkalle haastavia olosuhteita ovat koheesiomaalajit (savi ja siltti) ja maaperän suolaisuus, joissa syvyysulottuvuus voi jäädä alle metriin sähköä johtavan materiaalin aiheuttaman radioaallon nopean vaimenemisen vuoksi (Hänninen 1991). Hienoaainesta sisältävät moreenit ja täyttömaat ovat niin ikään hankalia kohteita maatutkaukseen nopean vaimenemisen vuoksi (Neal 2004). Suotuisimmat luotauskohteet ovat paksut hiekka- ja sorakerrokset kuten harjurakenteet (Hänninen 1991).

Maatutkaluotauksessa radioaallon kulkuun vaikuttaa väliaineen suhteellinen permittiivisyys (dielektrinen vakio), magneettinen susceptibiliteetti sekä sähköjohtavuus (Hänninen 1991). Suhteellinen permittiivisyys on yksikötön vakio, joka riippuu materiaalin permittiivisyydestä ja tyhjiön permittiivisyydestä. Suhteellinen permittiivisyys kuvastaa maatutkaluotauksessa materiaalin sähköisiä ominaisuuksia (esim. Baker et al. 2007). Susceptibiliteetin ajatellaan maaperätutkimuksissa yleisesti olevan vakio, eikä sillä näin ollen katsota olevan suurta merkitystä tutkimusten kannalta (Hänninen 1991).

Maatutkaluotauksen teoreettinen perusta voidaan yksinkertaistaa kaavoihin 1-7 (esim. Reynolds 1997, Saarenketo 2006 ja Robinson et al. 2013). Tässä työssä esitetään kaavat yksinkertaisessa muodossa ja kaavojen johtamiseen voi tutustua esimerkiksi Hänninen (1991), Neal (2004) ja Silvast ja Wiljanen (2008) julkaisuissa.

Radioaallon kulkunopeus väliaineessa, mikäli väliaineen susceptibiliteettiä ei oteta huomioon, on ainoastaan riippuvainen väliaineen dielektrisestä vakioista (esim. Saarenketo 2006). Dielektrisyys puolestaan määräytyy pääosin huokoisen väliaineen veden ja tyhjän huokostilan vaihtelusta (Hänninen 1991). Kuivilla väliaineilla dielektrisyys vaihtelee välillä 4–10 ja veden kyllästämillä väliaineilla välillä 16–35. Veden määrän kasvaessa väliaineen dielektrisyys kasvaa entisestään. Puhtaan veden dielektrisyysarvo on 81 (esim. Hänninen 1991, Neal 2004). Radioaallon kulkunopeus v (m/ns) riippuu valonnopeudesta tyhjiössä c (0,3 m/ns) ja suhteellisesta permittiivisyydestä ϵ_r seuraavasti

$$v = c / \sqrt{\epsilon_r} \quad (1)$$

.

Jotta maatutkalla tulkitut sähköiset rajapinnat voidaan muuttaa vastaamaan todellisia syvyyksiä, tarvitaan tieto radioaallon kulkunopeudesta väliaineessa. Kulkunopeuden määrittystä kutsutaan nopeusanalyysiksi ja sitä voidaan tehdä usealla tavalla (Neal 2004). Havaitun rajapinnan syvyys s (m) lasketaan radioaallon nopeudesta v (m/ns) ja radioaallon edestakaisin kulkemasta ajasta t (ns) seuraavasti

$$s = v * t / 2 \quad (2)$$

.

Maatutkaluotauksessa tulkitaan sähköisillä rajapinnoilla tapahtuvia muutoksia. Kun radioaalto saavuttaa rajapinnan missä sähköiset ominaisuudet ja sitä kautta suhteellinen permittiivisyys muuttuu, tapahtuu aallon heijastumista ja taittumista Snellin lain mukaan (esim. Neal 2004). Jos heijastus on riittävän vahva ja välittyy takaisin maanpinnalle vastaanottimeen, voidaan maatutkalaitteiston piirturilla havaita rajapinta (Hänninen 1991). Rajapinnalta ylöspäin heijastuvalle aallolle voidaan laskea heijastuskerroin R ja rajapinnalta alaspäin taittuneella aallolle taittumiskerroin T . Heijastuskerroin R riippuu rajapinnan ylemmän (ϵ_{r1}) ja alemman (ϵ_{r2}) kerroksen suhteellisesta permittiivisyydestä seuraavasti

$$R = (\sqrt{\epsilon_{r2}} - \sqrt{\epsilon_{r1}}) / (\sqrt{\epsilon_{r2}} + \sqrt{\epsilon_{r1}}) \quad (3)$$

.

Taantumiskerroin T puolestaan riippuu rajapinnan ylemmän (ϵ_{r1}) ja alemman (ϵ_{r2}) kerroksen suhteellisesta permittiivisyydestä seuraavasti

$$T = 1 - (\sqrt{\epsilon_{r2}} - \sqrt{\epsilon_{r1}}) / (\sqrt{\epsilon_{r2}} + \sqrt{\epsilon_{r1}}) \quad (4)$$

.

Dielektrisyyden lisäksi radioaaltoon vaikuttaa merkittävästi väliaineen sähkönjohtavuus ja siitä aiheutuva radioaallon vaimeneminen (Neal 2004). Hyvin sähköä johtavilla väliaineilla vaimeneminen on suurempaa kuin huonosti johtavilla (Hänninen 1991). Radioaallon vaimeneminen α (dB/m) riippuu väliaineen sähkönjohtavuudesta σ (S/m) ja väliaineen suhteellisesta permittiivisyydestä ϵ_r seuraavasti

$$\alpha = 1635 \sigma / \sqrt{\epsilon_r} \quad (5)$$

.

Maatutkaluotauksessa käytetyn antennin aallonpituus määrää antennin mahdollistaman vertikaalisen ja horisontaalisen erotuskyvyn. Aallonpituus λ riippuu antennin keskitajuudesta f_c (MHz) ja väliaineen suhteellisesta permittiivisyydestä ϵ_r seuraavasti

$$\lambda = 1000 c / (f_c \sqrt{\epsilon_r}) \quad (6)$$

.

Antennin mahdollistamaa vertikaalista erotuskykyä V (m) voidaan arvioida radioaallon kulkunopeuden v (m/ns) ja antennin keskitajuuden f_c (MHz) perusteella seuraavasti

$$V = v / (4f_c) * 1000 \quad (7a)$$

tai

$$V = v / (2f_c) * 1000 \quad (7b)$$

, jossa kaava 7a antaa pienimmän mahdollisen erotuskyvyn käytetyllä antennilla vallitsevassa nopeudessa. Todellisempi erotuskyvyn arvio saadaan kaavan 7b avulla, jolloin yksittäiset heijasteet ovat varmasti erotettavissa toisistaan. Korkea taajuisilla antennilla voidaan päästää jopa 1 cm:n erotuskykyyn, kun taas matala-taajuisilla antennilla erotuskyky voi olla muutaman metrien luokkaa. Tässä työssä käytettyjen antennien vertikaalista erotuskykyä on arvioitu taulukossa 1.

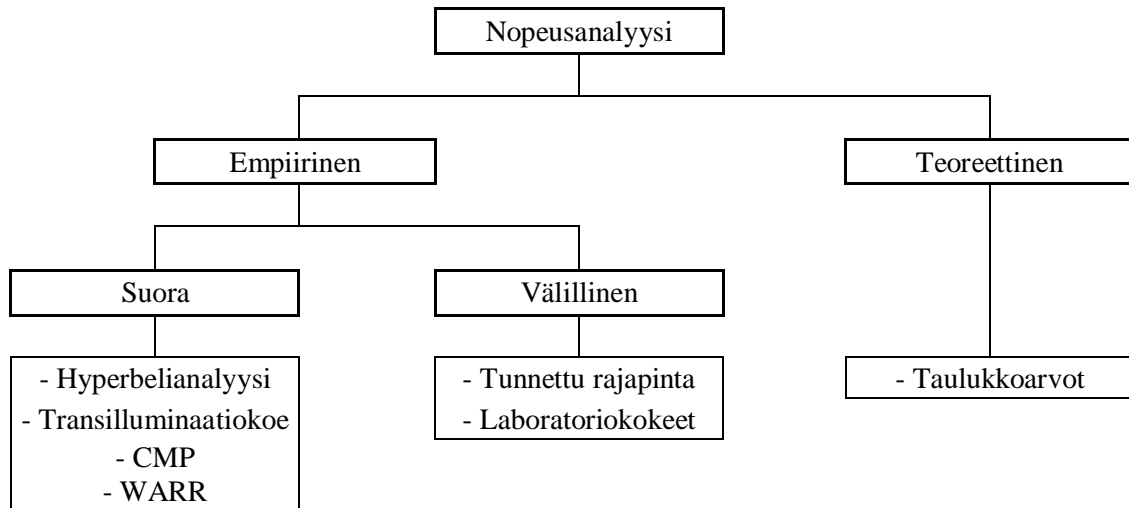
Taulukko 1. Tässä työssä käytettyjen antennien suuntaa antava vertikaalinen erotuskyky eri nopeuksilla. Erotuskyvyn vaihteluväli on laskettu kaavojen 7a ja 7b avulla.

Taajuus (MHz)	0,06 m/ns (m)	0,08 m/ns (m)	0,10 m/ns (m)	0,12 m/ns (m)	0,14 m/ns (m)
270	0,06 - 0,11	0,07 - 0,15	0,09 - 0,19	0,11 - 0,22	0,13 - 0,26
100	0,15 - 0,30	0,20 - 0,40	0,25 - 0,50	0,30 - 0,60	0,35 - 0,70
80	0,19 - 0,38	0,25 - 0,50	0,31 - 0,63	0,38 - 0,75	0,44 - 0,88
50	0,30 - 0,60	0,40 - 0,80	0,50 - 1,00	0,60 - 1,20	0,70 - 1,40
40	0,38 - 0,75	0,50 - 1,00	0,63 - 1,25	0,75 - 1,50	0,88 - 1,75
30	0,50 - 1,00	0,67 - 1,33	0,83 - 1,67	1,00 - 2,00	1,17 - 2,33

3. MAATUTKALUOTAUKSEN SYVYYSKALIBROINTI JA NOPEUSANALYYSIMENETELMÄT

Syvyyskalibrointi on maatutkaluotauksen prosessoinnin vaihe, jossa eri nopeusanalyysimenetelmin saatujen kerrosnopeuksien avulla muutetaan profiililinjän aikaskaalaus vastaamaan mahdollisimman hyvin todellisia syvyyksiä (esim. Neal 2004).

Maatutkaluotauksessa nopeusanalyysillä tarkoitetaan radioaallon kulkunopeuden selvittämistä maakerroksissa. Menetelmiä on lukuisia (esim. Neal 2004), joista vakiintuneimpia ovat taulukkoarvojen käyttö, laskemalla kairanreikätiöiden perusteella tunnetun rajapinnan syvyyden avulla, profiililuotausten diffraktiosignaalien hyperbelianalyysillä sekä CMP-luotauksilla (Kuva 1B) (Jacob et al. 2015). Näiden lisäksi nopeuksia voidaan selvittää laboratoriokokeilla, transilluminaatiotestillä (Kuva 1D) tai WARR-menetelmällä (Kuva 1C) (Jacob et al. 2015). Nopeusanalyysimenetelmät voidaan jakaa kuvan 2 tapaan empiirisiin ja teoreettisiin nopeusanalyysimenetelmiin. Lisäksi empiiriset analyysimenetelmät voidaan vielä jakaa menetelmiin, joista saadaan suoraan väliaineen nopeus ja menetelmiin, joista nopeudet saadaan välivaiheiden kautta.



Kuva 2. Nopeusanalyysimenetelmien jaottelu.

Yleisesti ottaen on aina suositeltavaa käyttää empiirisiä tutkimusmenetelmiä nopeuksien selvittämisessä (Jacob ja Urban 2015). Lisäksi muuttuvien olosuhteiden eliminoimiseksi erillinen nopeusluotaus olisi hyvä tehdä muutaman päivän sisällä profililinjien luotauksesta, jolloin tulokset vastaavat mahdollisimman tarkasti profililinjien olosuhteita. Radioaallon nopeudet voivat muuttua huomattavasti maaperän vesipitoisuuden muuttuessa esimerkiksi kevään sulamisvesien vaikutuksesta (Conyers 2013). Jos taas luodattavalta alueelta on kattavasti tiedossa maaperän koostumus, voidaan teoreettisia taulukkoarvoja hyödyntää harkinnan mukaan (Hänninen 1991). Tutkimusalueen olemassa olevat referenssiaineistot on syytä ottaa huomioon nopeusanalyysimenetelmää valittaessa. Nopeusanalyysimenetelmiä voidaan hyödyntää ristiin, jolloin voidaan varmistaa saatujen tulosten oikeellisuus. Käytetyt menetelmät tulisi valita yksilöllisesti kunkin kohteen ominaispiirteiden ja tutkimuksen tarkoituksen perusteella.

3.1. Taulukkoarvojen käyttö

Taulukkoarvoihin vertaaminen on yksi yleisimmistä tavoista arvioida radioaallon kulkunopeus (Jacob ja Urban 2015). Taulukkoarvoja hyödynnettäessä on oltava hyvä käsitys tutkittavasta maaperästä, jotta voidaan kohtuullisella luotettavuudella valita käytettävät arvot (Hänninen 1991). Taulukkoarvot ovat joko kokemuspäisästi, kokeellisesti tai laboratoriossa määritettyjä (Hänninen 1991, van Heteren et al. 1998).

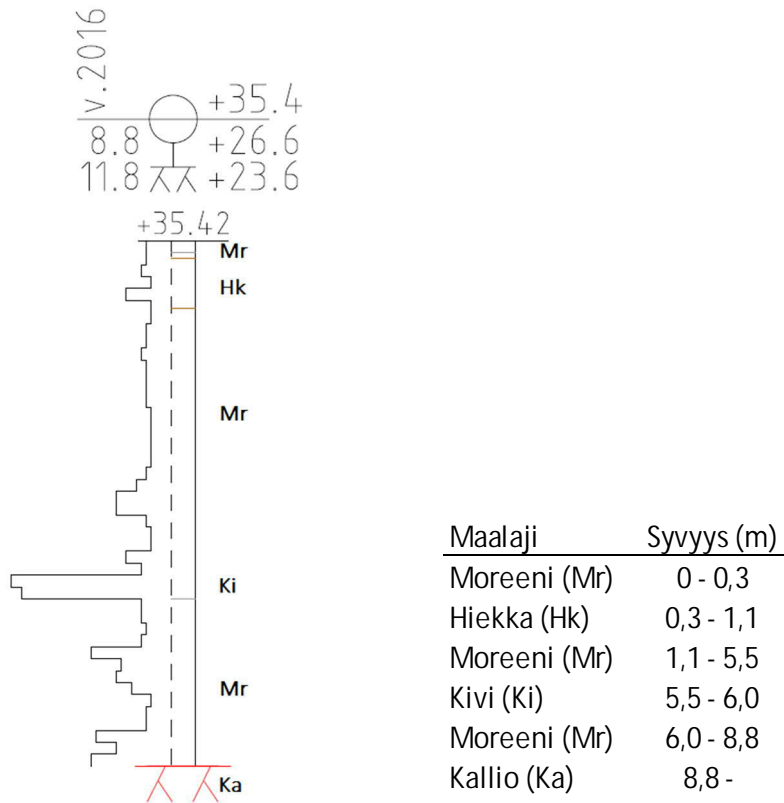
Jos aineiston käsittelijällä on tarkka käsitys luotausalueen mineralogiasta, raekoosta sekä maaperän vesipitoisuudesta, taulukkoarvoja käyttämällä voidaan päästä luotettaviin syvyyskalibrointeihin (Hänninen 1991). Toisaalta jos tarkat tiedot alueelta puuttuvat, niin on aina suositeltavaa tehdä empiirisiä tutkimuksia, jotta syvyyskalibrointi saadaan luotettavasti tehtyä (Jacob ja Urban 2015). Taulukkoarvot ovat aina suuntaa-antavia ja jokaisen maatutkauskohteen ominaispiirteet vaikuttavat radioaallon kulkunopeuteen. Taulukkoarvoissa annetaan usein vaihteluväli arvoille, jolloin aineiston käsittelijän harkintaan jää arvioida kunkin kohteen radioaallon kulkunopeudet. Taulukkoarvoja on saatavilla monista eri lähteistä ja arvot voivat vaihdella lähteestä riippuen suurestikin, jolloin käyttäjän ammattitaito ja lähdekriittisyys korostuvat. Taulukkoon 2 on kerätty Suomen oloissa tyypillisiä nopeuden arvoja useammasta lähteestä.

Taulukko 2. Taulukkoon on koostettu Suomen maaperässä tyypillisiä kerrosnopeuksia eri maalajeille. Lisäksi taulukossa on arvoja, joita kaupunkiympäristössä voi tulla vastaan. Tähdellä (*) merkityt maalajit edustavat veden kyllästämää kerrosta.

	Reynolds 1997 (m/ns)	van Heteren 1998 (m/ns)	Hänninen 1991 (m/ns)	Gamil 2015 (m/ns)
Ilma	0,300	0,300		
Vesi	0,033	0,033		0,033
Järven jää	0,150	0,160		
Sora	0,134	0,085 - 0,130	0,150	
Sora*		0,060	0,080	
Hiekka	0,122 - 0,173	0,100 - 0,200	0,150	0,173
Hiekka*	0,053 - 0,095	0,050 - 0,080	0,080	
Siltti	0,134 - 0,190	0,090 - 0,120	0,100	
Siltti*	0,055 - 0,064	0,050 - 0,070	0,060	
Karkea moreeni			0,100	
Karkea moreeni*			0,080	
Hienoainesmoreeni			0,080	
Hienoainesmoreeni*			0,060	
Moreeni		0,051 - 0,110		
Savi	0,134 - 0,212	0,090 - 0,120		
Savi*	0,047 - 0,106	0,050 - 0,070		
Turve	0,033 - 0,040	0,040 - 0,057	0,040	
Asfaltti	0,134 - 0,173			
Betoni	0,055 - 0,150			
Metalliputki				0,249
Muoviputki	0,173			0,173
Kallio (graniitti)	0,106 - 0,120	0,120 - 0,130		

3.2. Vertaaminen tunnettuun rajapintaan

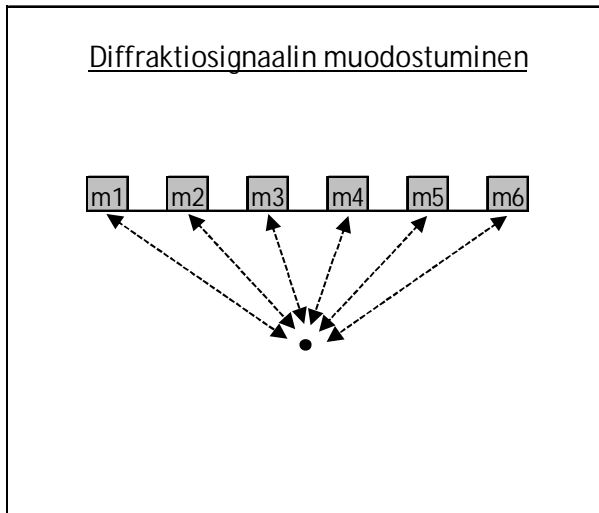
Vertaaminen tunnettuun rajapintaan voi joissain tilanteissa olla helppo ja yksinkertainen tapa tehdä syvyyskalibrointi. Yleisin tapa rajapintojen selvittämiseen on tehdä tai hyödyntää aiempia koekairauksia luotauslinjojen varrelta, jolloin saadaan rajapintojen tarkat syvyydet selville ja niiden perusteella radioaallon kulkunopeus rajapintojen yläpuolisille kerroksille. Rajapinnat voivat olla myös esimerkiksi esillä sorakuoppien romahtaneilla sivuilla. Tunnettu rajapinta voi myös olla esimerkiksi pohjavedenpinnan taso. Toinen yleinen tapa on kaivaa koekuoppa esimerkiksi kaivinkoneella. Rajapinnat voi saada näin näkyville. Lisäksi voidaan sijoittaa esimerkiksi metalliputki halutulle syvyydelle. Kun metalliputken yli tehdään maatutkaprofiililinja, näkyy metalliputki profiilissa selkeänä heijasteena ja tunnetun syvyyden avulla voidaan laskea radioaallon kulkunopeus (Jacob ja Urban 2015). Metalliputken tapauksessa voidaan myös hyödyntää metalliputken pistemäisestä olemuksesta syntyvää diffraktiosignaalia. Toisaalta kuoppia ja kairauksia tekemällä menetetään maatutkan yksi merkittävimmistä valteista eli tiedon saanti ilman että maanpintaa tarvitsee rikkoa. Kuvassa 2 on esimerkki kairaamalla saadusta kairausdiagrammista. Diagrammin perusteella voidaan tulkita syvyydet kairausyvytyteen asti. Kairausdiagrammeja tulkittaessa on hyvä muistaa, että maalajimääritykset on usein tehty kairausvastuksen perusteella. Kuvassa 2 moreenin päälle on tulkittu hiekka, jonka päälle on tulkittu uusi moreenikerros. Tämä on todennäköisesti tulkinnallinen virhe tai sitten kyseessä on hyvin harvinaislaatuinen muodostuma, jossa olisi eri aikaan muodostuneita moreenipeitteitä.



Kuva 3. Kairausdiagrammi Patolasta, Helsingissä ja diagrammista tulkitut syvyydet.

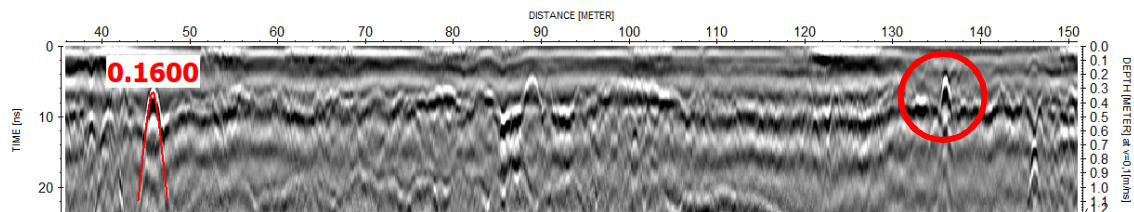
3.3. Hyperbelianalyysi

Hyperbelianalyysissä hyödynnetään luodun maatutkaprofiilin pistemäisiä heijasteita ja niistä aiheutuneita diffraktiosignaaleja (esim. Neal 2004). Diffraktiosignaali aiheutuu maatutkasignaalin laajasta noin 45 asteen keilakulmasta (Neal 2004). Tämä tarkoittaa, että pistemäiset kohteet voidaan havaita jo ennen kuin tutka on kohteen päällä ja vielä silloinkin kuin tutka on kohteen ohittanut (Kuva 4). Näiden signaalien perusteella voidaan laskea väliaineelle nopeus käyttäen prosessointiohjelmien hyperbelisovitusta (Neal 2004).



Kuva 4. Diffraktiosignaalin muodostuminen profiililuotauksessa. Sama piste havaitaan mittauspisteiden m1-6 kohdalla.

Hyperbelianalyysin käytön perustana, että luotauslinjalta löytyy pistemäisiä heijastajia. Ilman heijastajia on turvauduttava muihin nopeudenmäärittämenetelmiin. Kuvassa 5 on luotauslinja Patolasta, jossa on havaittavissa pistemäisiä heijasteita täyttömaakerroksessa.



Kuva 5. Patolan luotauslinjalta löytyviä pistemäisiä heijasteita, joihin voidaan sovittaa hyperbelisovitus nopeudenmäärittystä varten. Tässä kohteessa saadaan täyttökerrokselle vasemmalla nopeus 0,16 m/ns kerrosnopeudeksi. Oikealla ympyröitynä toinen pistemäinen heijaste, johon voitaisiin sovittaa hyperbelimallia.

3.4. Laboratoriokokeet

Nopeuden määrittäminen laboratoriossa vaatii näytteenottoa tutkuskohdeelta. Näytteet kuljetetaan vesitiiviissä astiassa laboratorioon, jossa näytteet tutkitaan (Conyers 2013). Toinen mahdollinen tutkimustapa on hienontaa otettu maanäyte ja tutkia näytteet lisäämällä maanäytteeseen haluttu vesipitoisuus (Conyers 2013). Laboratoriokokeiden tarkoituksena on selvittää näytteen sähköiset ominaisuudet, joiden avulla voidaan selvittää teoreettinen radioaallon kulkunopeus kullekin näytteelle (Conyers 2013). Laboratoriomenetelmien huono puoli on, etteivät näytteet koskaan

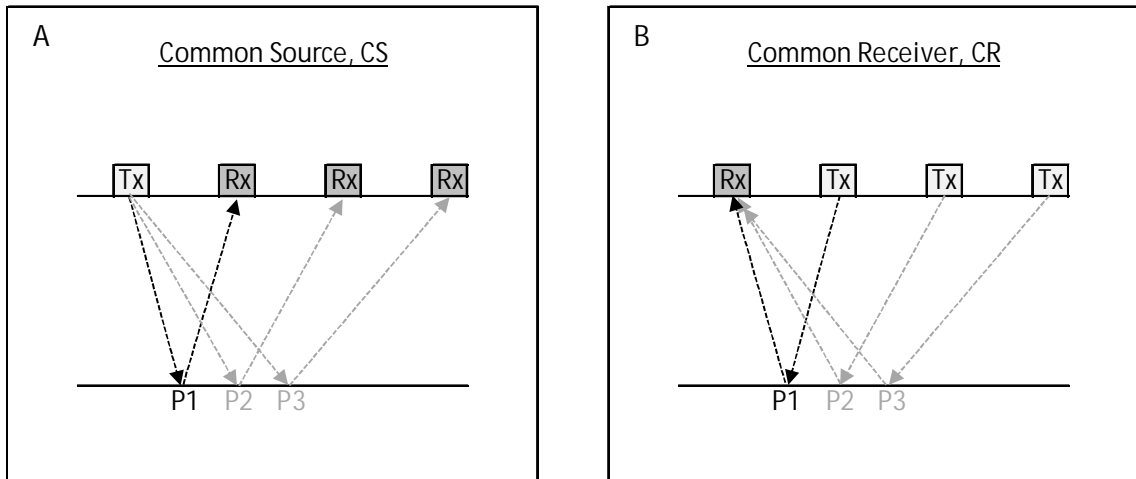
vastaa luonnontilaa. Vesipitoisuudessa huokoisuudessa ja maarakeiden suuntauksessa tapahtuu väistämättä muutoksia kuljetuksessa luonnontilaan verrattuna (Conyers 2013).

3.5. Transilluminaatiokoe

Transilluminaatiokoetta käytetään kairareikissä suoritettavien maatutkamittausten yhteydessä (Murray et al. 2000) ja selvittäessä koekuoppien välistä maa-aineksen nopeusprofiilia (Conyers 2013). Yhteen kairareikään upotetaan lähetin valitulle syvyydelle ja ympäröiviin kairareikiin asetetaan vastaanottimet halutuille syvyyksille. Lähettimestä vastaanottimeen kulkema aika mitataan, jolloin saadaan laskennallisesti selville väliin jäävän kerroksen radioaallon kulkunopeus. Muista menetelmistä poiketen transilluminaatiokokeessa selvitetään ainoastaan yhteen suuntaan kulkevan aallon kulkuaika (Conyers 2013). Kulkunopeus on luotettava ja yleistettävissä ainoastaan, jos lähettimen ja vastaanottimen välillä väliaineessa ei tapahdu muutoksia (Conyers 2013). Muutoksia syntyy esimerkiksi leikkaavista kerroksista tai kallion kielekkeestä. Transilluminaatiokokeen periaate on esitetty kuvassa 1D.

3.6. WARR-luotaus

WARR- ja CMP-luotaukset ovat keskenään hyvin saman-tyyppiset nopeusanalyysimenetelmät. Erona on, että WARR-luotauksessa joko vastaanotin (Common Receiver) tai lähetin (Common Source) pysyy paikoillaan vastaparia liikuteltaessa mittausten välissä (Conyers 2013). CMP-luotauksessa niin lähetin kuin vastaanotinkin liikkuvat samaan aikaan (Neal 2004). Nopeuden määrittäminen WARR-luotauksessa perustuu etäisyyden ja edestakaisen aallon kulkuajan muutokseen syvyyden pysyessä samana (Jacob ja Urban 2015). WARR-luotauksen periaate on havainnollistettu kuvassa 6.



Kuva 6. WARR-luotauksen konfiguraatiot ja mittausperusta. (A) Common Source -mittaus, jossa lähetin pysyy paikallaan vastaanottimen liikkuesssa mittausten välissä. (B) Common Receiver -mittaus, jossa vastaanotin pidetään paikoillaan lähetimen liikkuesssa mittauspisteiden välissä. P1-P3 osoittavat syvyyspisteen vaihtamisen lähetimen (Tx) ja vastaanottimen (Rx) etäisyyden kasvaessa.

WARR-luotauksen tapauksessa mittauksen keskipiste vaeltaa kauemmas paikallaan olevasta antennin osasta, kun puolestaan CMP-luotauksessa keskipiste pysyy samana (Neal 2004). Niin WARR- kuin CMP-luotaus vaatii toimiakseen jatkuvia horisontaalisia heijasteita, mikä tekee menetelmästä haasteellisen (Conyers 2013). Kaltevat ja epäjatkuvat pinnat aiheuttavat häiriösignaaleja, jolloin aineiston tulkinta hankaloituu (Everett 2013). WARR-luotaus on näistä kahdesta luotausmenetelmästä herkempi vaihteleville ympäristöille, jonka vuoksi CMP-luotaus on näistä suositellumpi (Conyers 2013). WARR-luotauksen vahvuutena on kuitenkin se, että mittauksen voi suorittaa tarvittaessa yksikin mittaja laitteistoista riippuen (Conyers 2013, GSSI antenna manual). WARR-luotauksen nopeusaineistoa ei suositella käytettäväksi syvien kerrosten nopeuksien määrittämiseksi, ellei maankamaran kerrosrakenne ole hyvin selvillä (Conyers 2013).

3.7. CMP-luotaus

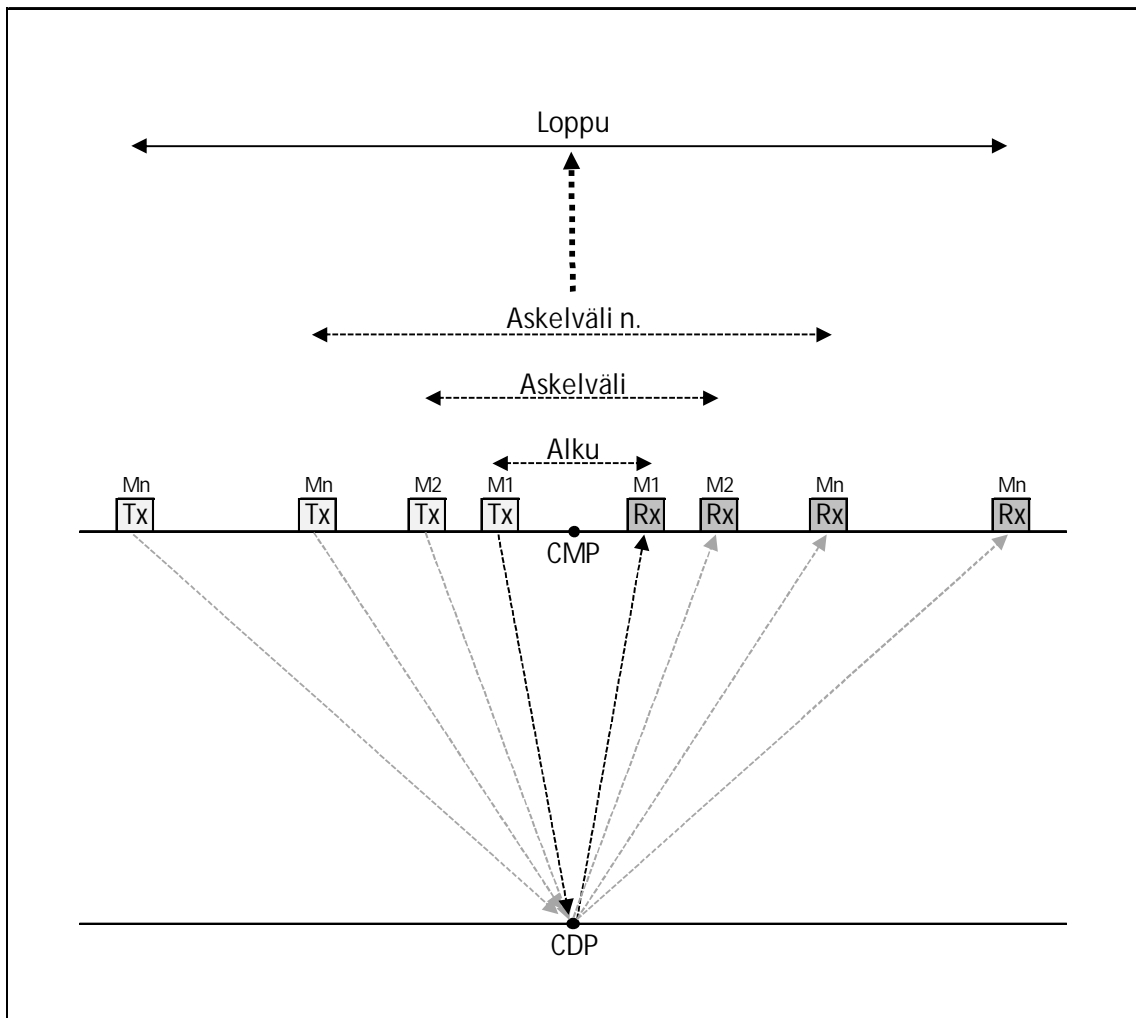
CMP-luotaus on maailmalla yksi yleisimmistä nopeusanalyysimenetelmistä (Conyers 2013). Sen käytön suosio perustuu CMP-luotauksen empiiriseen tutkimukseen kuitenkin menettämättä maatutkaluotauksen ehdotonta valttia, eli sitä että maanpintaa ei tarvitse rikkoa tutkimuksia varten (Conyers 2013). Kuten WARR-luotauksessa edellä hyödynnetään CMP-luotauksessa erillistä lähetintä ja vastaanotinta (Neal 2004). Erona WARR-luotaukseen on se, että sekä lähetintä että

vastaanotinta siirretään mittausten välissä tasamatka kauemmas mitattavasta keskipisteestä. Mittaustapaa on havainnollistettu kuvassa 1B.

CMP-luotaus, eli Common Mid Point -luotaus, saa nimensä siitä, että mittausten toistuessa lähettimen ja vastaanottimen välinen keskipiste pysyy samana (Jol 2008). Tämä piste valitaan joko ennen muita mittauksia tai esimerkiksi maatutkan profiililinjoiden perusteella. CMP-luotauksesta käytetään myös nimitystä CDP (Common Depth Point) -luotaus (Hänninen 1991). CDP-pisteellä tarkoitetaan maankamaran heijastuspistettä, josta radioaallot heijastuvat takaisin kohti vastaanotinta. Horisontaalisten kerrosten tilanteessa kerrosrajojen CDP-piste sijaitsee täsmälleen maanpäällisen CMP-pisteen kohdalla. Kun CDP-pisteet ovat suoraan CMP-pisteen alla, saadaan täsmällisin luotauktulos. Jos CDP-piste ei pysy paikoillaan toistuvien mittausten edetessä, vääristyy myös mittaustulos (Everett 2013). Tärkeää CMP-luotauksessa on siis löytää horisontaalisia kerroksia mahdollisimman tasaiselta maapohjalta.

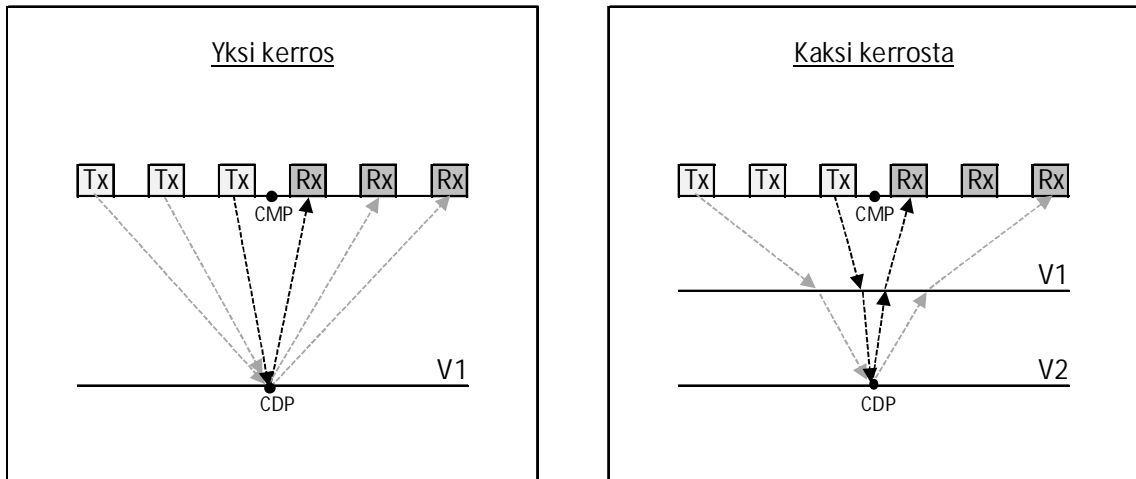
CMP-mittaus suoritetaan asettamalla antennielementit vastakkain CMP-pisteen molemmin puolin. Ensimmäisen mittauksen etäisyys on määritelty kunkin valmistajan ja antennin ominaisuuksien mukaan. Esimerkiksi tässä tutkimuksessa käytetyn GSSI:n MLF-antennin (Multiple Low-Frequency Antenna) aloitusetäisyydeksi 80 MHz:n konfiguraatiolla on määritelty 0,5 metriä CMP-pisteen molemmin puolin. Ensimmäisen mittauksen jälkeen mittauksia toistetaan tasavälein niin kauan kuin saadaan heijasteita rajapinnoilta. Kirjallisuudessa ei ole määritetty mitään yleispätevää askelväliä, mutta mitä tiheämpi askelväli on, sen tarkempi on myös mittaustulos. Tiheällä askelvälillä mittaukseen kuluva aika kuitenkin lisääntyy huomattavasti, joten askelväli on hyvä mitoittaa kunkin kohteen ominaispiirteisiin. Tässä työssä käytettiin 0,2 metrin askelväliä, jolloin 30 metrin luotaukseen kului aikaa noin 30 minuuttia. CMP-mittauksen periaate on hahmoteltu kuvaan 7.

CMP-luotaus, kuten valtaosa muistakin luotausmenetelmistä, perustuu radioaallon heijastumiseen ja taittumiseen sähköisten ominaisuuksien muuttuessa rajapinnoilla. Sähköisten ominaisuuksien muuttuessa radioaalto taittuu, heijastuu ja vaimenee. CMP-luotauksen mittausten edetessä (M1-Mn kuvassa 7) ja antennielementtien välimatkan kasvaessa kasvaa myös radioaallon väliaineessa käyttämä kuluaika. Sähköisen rajapinnan pysyessä samalla syvyydellä voidaan radioaallon kuluaajan sekä mittausetäisyyden perusteella selvittää väliaineen nopeusprofiili. Helpoiten nopeusprofiilit ovat selvitettävissä hyödyntämällä signaalinkäsittelyohjelmia, mutta kerrosnopeuksia on mahdollista laskea myös ilman niitä.



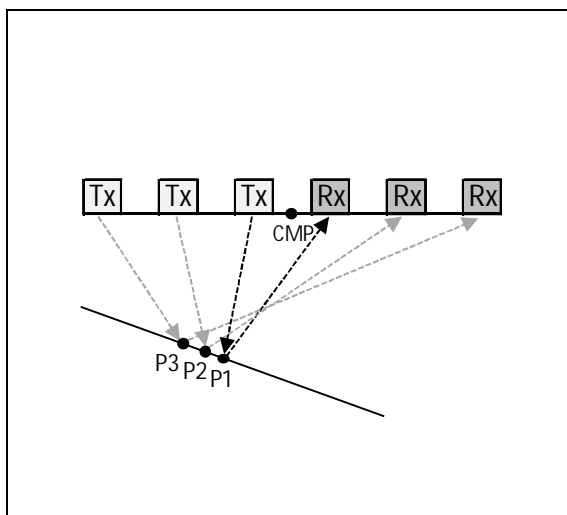
Kuva 7. CMP-luotauksen periaate. Ensimmäisen mittauksen (M1) jälkeen lähettimen ja vastaanottimen välimatkaa kasvatetaan halutun askelvälin (n) mukaan. Mittausta jatketaan niin pitkään, kun saadaan vastesignaaleja CDP-pisteeltä.

CMP-luotauksella saadaan periaatteessa aina ensimmäisen maakerroksen nopeus, mikäli rajapinnalla sijaitsevan CDP-pisteellä on antennin erotuskyvylle riittävä horisontaalinen pinta-ala ja rajapinta sijaitsee antennin syvyysulottuvuuden mahdollistamalla syvyydellä. Mitä useammasta kerroksesta halutaan nopeustietoa, sitä epävarmemmaksi nopeustieto käy (Everett 2013). Useamman nopeuskerroksen luotauksella on hahmoteltu kuvaan 8. CMP-luotauksella ei suositella käytettäväksi syvien nopeusprofiilien hankintaan, ellei luotausalueen kerrosrakenteesta ole hyvää yleiskuvaa.



Kuva 8. CMP-luotauksen periaate useamman kerroksen tilanteessa.

Niin CMP-luotaus kuin WARR-luotauskin nojaavat vahvasti oletukseen horisontaalisista kerrosrakenteista. Luodattaessa kaltevaa pintaa CMP-luotauksella muuttuu CDP-pisteen sijainti luotauksen edetessä (Kuva 9), jolloin luotauksen tarkkuus kärsii. Mitä kaltevampi pinta on, sitä merkittävämpi on vääristymä. Useamman kerroksen tapauksessa hankaloituu tulkinta entisestään (Everett 2013).

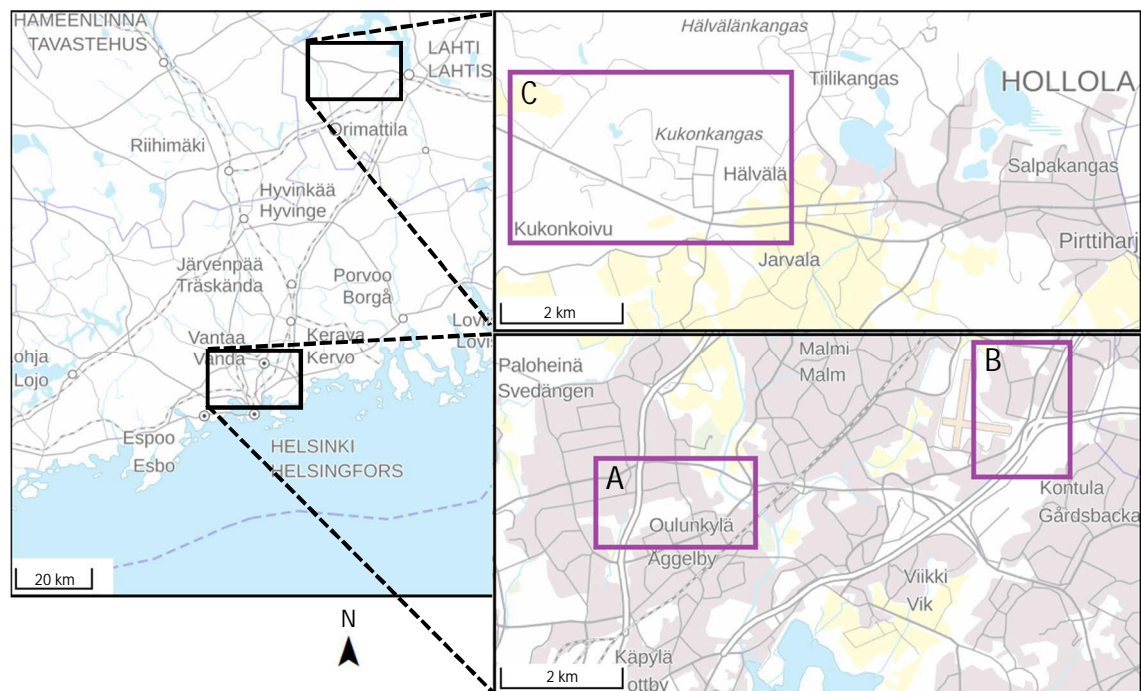


Kuva 9. CMP-luotaus kaltevalla pinnalla. Mittausten välillä CDP-pisteen P1-P3 keskikohta vaeltaa, jolloin ei saada luotettavaa mittausdataa.

Verrattuna WARR-luotaukseen on CMP-luotaus suositellumpi (Conyers 2013). Molemmilla menetelmillä on etunsa, mutta WARR-luotaus on kuitenkin haavoittuvampi kaltevien pintojen tapauksissa (Conyers 2013). Maaperätutkimuksessa maankamaran kerrokset eivät välttämättä ole

täysin horisontaalisia, jolloin WARR-luotaus tuottaa näistä menetelmistä herkemmin vääriä tuloksia. CMP-luotaukselle riittää pienikin horisontaalinen taso muuten vaihtelevassa kerroksessa. Tällöin saadaan ainakin ensimmäisen kerroksen nopeus. Useamman kerroksen tapauksessa vaihteleva taso vääristää myös CMP-luotauksen tuloksia, muttei niin paljoa kuin WARR-luotauksen tapauksessa (Conyers 2013).

4. TUTKIMUSALUEET JA AINEISTON KERUU



Kuva 10. Tutkimusalueiden sijainnit. (A) Patolan metsä. (B) Tattarisuon pohjavesialue. (C) Hollolan deltamuodostuma. Aineisto: Maanmittauslaitos ®

Tämän tutkimuksen esimerkkikohteet sijaitsevat Etelä-Suomessa Helsingissä ja Hollolassa (Kuva 10). Helsingissä sijaitsee kohteista kaksi ja Hollolassa yksi kohde. Helsingin kohteet ovat Patolan metsä (Kuva 10A) ja Tattarisuon pohjavesialue (Kuva 10B). Hollolan tutkimusalue on kuvassa 10C.

4.1. Käytetyt maatutkalaitteistot

Mittauksissa käytettiin kahden eri valmistajan maatutkalaitteistoja: Geophysical Survey System Inc. (GSSI) ja Malå Geoscience. Kahden eri laitteiston hyödyntämisen tarkoituksena oli laajentaa maatutkaosaamista useampaan laitteeseen, hyödyntää useaa keskitaajuutta kullakin maatutkalinjalla sekä tehdä vertailevaa analysointia laitteistojen käyttökokemuksesta.

4.1.1. *Geophysical Survey System Inc.*

Geophysical Survey System Inc. (GSSI) (www.geophysical.com) on yhdysvaltalainen maatutkalaiteiden valmistaja ja yksi suurimmista maatutkalaitteistojen toimittajista maailmanlaajuisesti. GSSI:n laitteisto koostuu näytöllisestä keskusyksiköstä ja kulloinkin käytössä olevasta antennista ja lisälaitteista. Laitteiston kanssa on mahdollista käyttää mittapyörää sekä luotauslinjan aloitus- ja lopetuspisteen tallentavaa GPS-laitetta (GSSI antenna manual).

Tässä työssä hyödynnettiin GSSI:n Sir-3000 keskusyksikköä. Antenneina käytettiin suojattua 270 MHz:n antennia (Kuva 11) sekä CMP-mittauksessa käytettyä suojaamatonta levitettävää 3200 MLF -antennia (Kuva 12). 3200 MLF -antennin keskitaajuutta voidaan muuttaa 16–80 MHz:n välillä. Tässä työssä käytössä oli 80 MHz:n sekä 40 MHz:n antennikonfiguraatiot. Antenneille käytetyt mittauseräparametrit on esitetty taulukossa 3. Profiililuotauksessa käytettiin mittapyörää.



Kuva 11. GSSI:n 270 MHz:n antenni vetosauvan kanssa. Luotauksissa käytettiin lisäksi antennin takaosaan kiinnitettävää mittapyörää.



Kuva 12. CMP-luotauslaitteisto Tattarisuonpohjavesialueella. Kuvassa lähetin ja vastaanotin sekä mittausta helpottava mittanauha. Kuva: Emilia Koivisto.

Taulukko 3. GSSI:n laitteistojen parametrit.

	GSSI		
Antennin keskitaajuus	270 MHz	80 MHz	40 MHz
Mittausaika	250 ns	800 ns	1200 ns
Otantataajuus	100 KHz	12 KHz	12 KHz
Pinoaminen	-	5	5

4.1.2. Malå Geoscience

Malå Geoscience on ruotsalainen maatutkavalmistaja (www.guidelinegeo.com), joka on niin ikään yksi suurimmista maatutkalaitteistojen globaaleista toimittajista. Malån laitteisto koostuu keskusyksiköstä, näytöstä ja antenneista. Lisäksi voidaan hyödyntää etäisyyden mittaamiseen mittapyörää tai mittalankaa. Toisin kuin GSSI:n laitteisto, Malån laitteisto tukee jatkuvaa GPS-mittausta (Malå ProEx manual).

Tässä työssä käytetty Malån laitteisto koostui kaksimoduulisesta ProEx-keskusyksiköstä, näytöstä sekä kolmesta erilaisesta suojaamattomasta RTA (Rough Terrain Antenna) -antennista. Käytössä olleet antennit olivat 100 MHz:n, 50 MHz:n sekä 30 MHz:n, joista kahta käytettiin kerralla kohteesta riippuen (Kuva 13). Malån antenneilla käytetyt parametrit on esitetty taulukossa 4. RTA-antennit on suunniteltu syviin luotauksiin hankalassa maastossa (Malå RTA antenna manual). Lisäksi Malån laitteistoon kiinnitettiin GPS-laitteisto (Garmin GPSmap 60CSx). Mittauksissa hyödynnettiin myös mittapyörää.

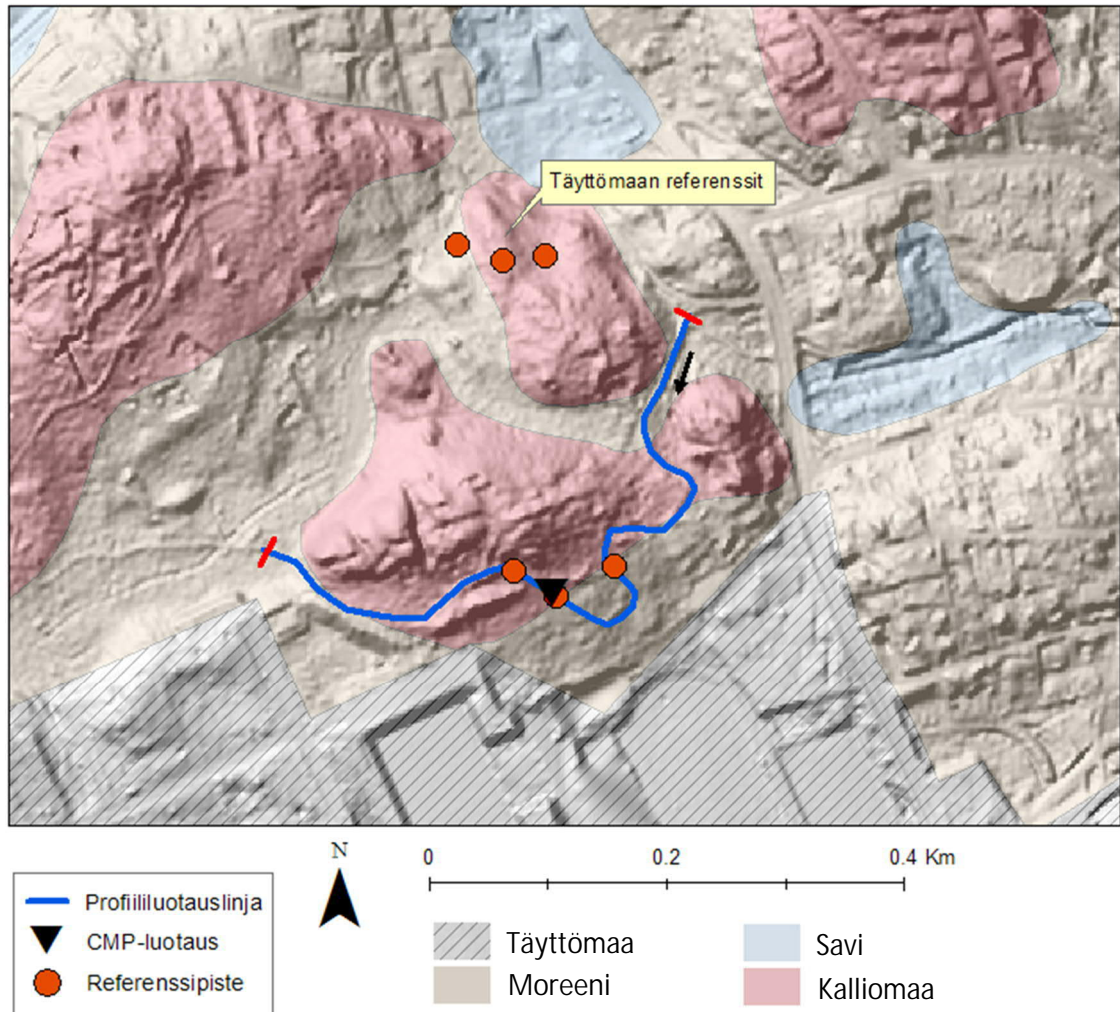


Kuva 13. Profiililuotausta Tattarisuon pohjavesialueella käyttäen Malå:n 50 MHz:n ja 100 MHz:n antennia.

Taulukko 4. Malå:n antennien parametrit.

	Malå		
Antennin keskitaajuus	30 MHz	50 MHz	100 MHz
Mittausaika	1200 ns	1000 ns	800 ns
Otantataajuus	300 MHz	500 MHz	1000 MHz
Pinoaminen	-	-	-

4.2. Patolan metsä



Kuva 14. Luotauslinjan sijainti Patolan alueella Helsingissä. Musta kolmio osoittaa CMP-luotauksen sijainnin. Punaisella pisteellä on osoitettu tutkauslinjalle referenssinä käytetyt tutkimuspisteet. Aineistot: GTK® ja Maanmittauslaitos ®

Patolan metsä sijaitsee Helsingissä, Oulunkylän kaupunginosan pohjoisosassa. Metsä rajoittuu pohjoisessa Itä-Pakilan pientaloalueeseen, idässä Yhdyskunnantiehen, etelässä Oulunkylän urheilupuistoon sekä Patolan pientaloalueeseen ja lännessä Tuusulanväylään (Kuva 14). Patolan metsäalue on ollut ensimmäisen maailmansodan aikaan osa Helsingin alueen puolustusrintamaa ja alueen luoteisosassa on nykyäänkin suojeltuja maamerkkejä tuon aikaisista rakennelmista ja puolustuslinjoista (Hankiola et al. 2008). Nykyään Patolan metsä toimii alueen lähiliikunta-alueena ja siellä sijaitsee Helsingin kaupungin ylläpitämiä ulkoilureittejä, pienempiä polkuja ja ulkokuntosaleja (Helsingin kaupungin karttapalvelu 29.11.2019).

Ympäristöltään alue sijoittuu kahden kalliokohouman väliin tehden alueesta hyvin vaihtelevan. Kalliot sijaitsevat metsän itä ja länsipuolella jättäen väliin Helsingin alueella harvinaisen soisen nevan (Koskinen ja Mikkola 2007). Kallioisilla alueilla puusto on mäntyvaltaista, mutta mitä keskeemmälle aluetta siirrytään, muuttuu metsä hyvinkin kosteaksi ja kuusivaltaiseksi.

Tämän työn tekohetkellä Patolan metsä on ollut hyvinkin ajankohtainen aihe siellä tehtävän kaasuputken siirron vuoksi (www.hel.fi/uutiset/fi/kaupunkiymparisto/kaasuputkelle-uusi-linjaus-patolan-metsassa) (Helsingin kaupunki 28.11.2019). Alun perin putken oli tarkoitus kulkea metsän ja suon halki, mutta lopulta linja muutettiin kulkemaan kutakuinkin nykyisten ulkoilureittien kohdalle. Putkilinjaa muutettiin, jotta alueen harvinainen suoymäristö, kasvilajisto ja liito-oravien reviirit pysyisivät mahdollisimman koskemattomina. Putkilinjan siirto liittyy Raide-Jokeri-raitiolinjan rakennushankkeeseen.

4.2.1. Geologia

Patolan metsän korkokuvan määrää paleoproterotsooinen kallioperä. Metsän länsi- ja pohjoisosat ovat graniittista kalliota ja itä- ja eteläosa puolestaan metamorfista kvartsi-maasälpägneissia (GTK Hakkutietokanta 20.11.2019). Graniittinen puoli kalliosta on hyvin loivarinteistä, kun taas kvartsi-maasälpägneissi on hyvinkin teräväpiirteistä ja vaihtelevaa korkokuvaltaan. Alueella on paljon ruhjelinjoja ja kallion rakoja (Hankiola et al. 2008). Kallioisten osien väliin jäävä painanne on mahdollisesti ruhjevyöhyke kahden kivilajin kontaktissa.

Maaperä alueella on moreenivoittoista (GTK Hakkutietokanta 20.11.2019). Kallion painanteita peittää referenssiaineistojen perusteella kivinen moreenikerros (KiMr). Syvemmissä painanteissa on kairaustietojen perusteella lisäksi hiekkaisempaa moreenia (HkMr). Kallioiden väliin jäävässä painanteessa on lisäksi tulkittu hiekkakerros (Hk) moreenin päälle (Helsingin kaupungin karttapalvelut 20.11.2019). Alueen keskellä olevalla suolla on turvetta (t) (Koskinen ja Mikkola 2007). Suon pintaa voidaan pitää kallioiden väliin jäävän maaston pohjavedenpinnantason referenssinä. Aluetta ympäröiville kuntopoluilla on täyttömaata (Tä).

4.2.2. Maatutkalinjat

Patolan maatutkalinjat tehtiin kahdessa osassa. Ensimmäiset luotauslinjat tehtiin toukokuussa 2018 ja linjoja täydennettiin helmikuussa 2019. Kesällä 2018 tehtiin suuri määrä profiililuotauksia ja lisäksi yksi CMP-luotaus alueen eteläosasta. Tämä oli ensimmäinen kerta, kun CMP-luotausta kokeiltiin tämän työn osalta. Kesän luotauksilla saatiin lähinnä kokemusta CMP-luotauksen tekemisestä ja saatiin profiililuotauksilla kartoitettua CMP-luotaukselle soveltuvia kohtia.

Helmikuussa 2019 luodattiin tässä työssä pääasiassa käytetyt luotauslinjat. Luotauslinja tehtiin olemassa olevaa ulkoilureittiä pitkin Patolan metsän itäosasta, missä aiempien profiililuotausten perusteella oli selkeähkö kohta suorittaa CMP-luotaus ja kohdasta oli myös hyvin referenssiaineistoa olemassa. Profiililuotaukset oli tarkoitus tehdä 50 MHz:n, 100 MHz:n ja 270 MHz:n antennitaajuuksilla. Laiterikon vuoksi 50 MHz:n ja 100 MHz:n antenninen käyttö ei kuitenkaan onnistunut vaan ainoana uutena profiililinjana saatiin 270 MHz:n antennin luotaus ja 80 MHz:n antennin CMP-luotaus. Tuloksinassa hyödynnettiin kesällä 2018 luodattuja profiililinjajoja.

4.2.3. Referenssiaineistot

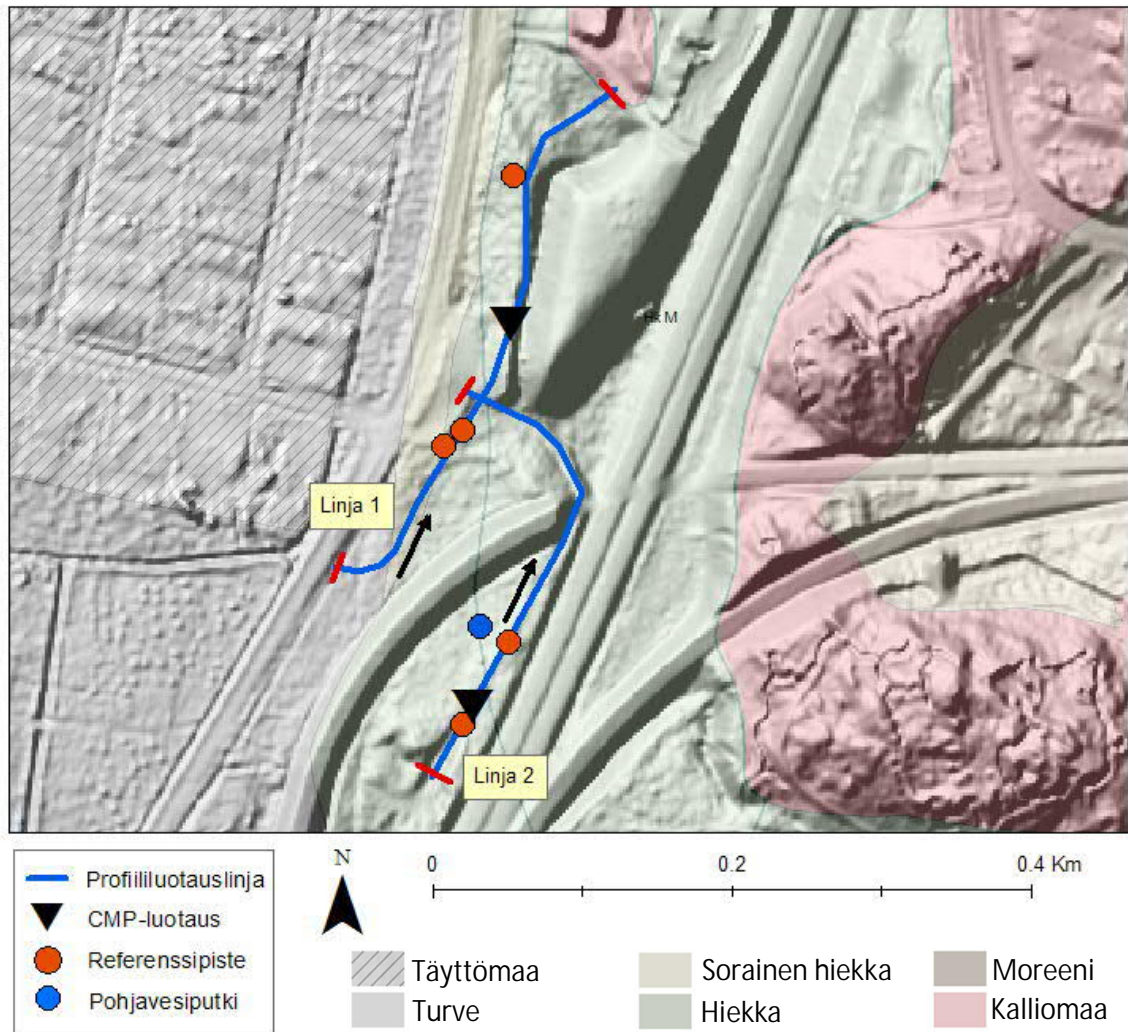
Patolan metsän alueelta on olemassa paljon Helsingin kaupungin teettämää kairaustietoa. Alue on vuodesta 1970 asti ollut ulkoilukäytössä ja valtaosa referenssikairauksista onkin tuolta ajalta (Helsingin kaupungin karttapalvelu 20.11.2019). Referenssiaineiston ikä tuo jonkin verran epävarmuustekijöitä, kun tarkkaa tietoa ympäristön muutoksesta vuosien varrelta ei ole. Epävarmaa on, millä tarkkuudella tulokset on esitetty, miten tarkka on ollut sijaintitiedon tallennus ja mitä on referenssipisteiden oton jälkeen alueella tapahtunut. Merkittävä yksittäinen ero liittyy ulkoilureiteille laitettuun täyttömaahan. Vuoden 1969 referenssipisteiden mukaan täyttöä ei juuri ole, mutta maatutkaluotauksilla saatujen arvioiden mukaan täyttöä voisi olla jopa puolen metrin luokkaa. Alueelta on kaasuputken siirtoon liittyen jonkin verran uudempaa referenssimateriaalia kaasuputken siirtoon liittyen, missä täytön määrä on noin 0,35 metriä (Kuva 14).

Tähän työhön valitun luotauslinjan referenssipisteet on kairattu vuonna 1969. Referenssipisteet sijaitsevat lähellä luotauslinjaa, noin puolen metrin etäisyydellä. Maaperä on tulkittu kiviseksi moreeniksi (KiMr) ja syvemmissä kohdissa hiekkaiseksi moreeniksi (HkMr). Kallionpinta luotauslinjalla vaihtelee kalliopaljastumista ainakin referenssipisteiden 2,4 metriin. Luotauslinjalla olevat referenssit on esitelty taulukossa 5. Uudempien kairauksien perusteella Patolan alueella on noin 0,35 metrin täyttökerros ulkoilureittien peitteenä (Helsingin kaupungin karttapalvelu 20.11.2019).

Taulukko 5. Patolan profiililuotauslinjan referenssiaineistot. Referenssien perusteella päällimmäinen maakerros on kivistä moreenia (KiMr). Tämän alla on kerros hiekkaista moreenia (HkMr), jonka alla on kallo (Ka). Täyttömaan paksuudeksi alueelle on arvioitu noin 0,35 metriä. Referenssit on tulkittu Helsingin kaupungin kairausdiagrammeista. Sulkeissa on ilmoitettu luotauslinjalla lähin piste luettuna linjan alusta päin. Luotauslinjan referenssit on havainnollistettu kuvaan 14.

Referenssi 1 (278 m)		Referenssi 2 (370 m)		Referenssi 3 (412 m)	
Maalaji	Syvyys	Maalaji	Syvyys	Maalaji	Syvyys
KiMr	0,0 - 0,3	KiMr	0,0 - 1,7	KiMr	0,0 - 0,8
Ka	0,3 -	HkMr	1,7 - 2,4	HkMr	0,8 - 2,1
		Ka	2,4 -	Ka	2,1 -

4.3. Tattarisuon pohjavesialue



Kuva 15. Luotauslinjojen sijainnit Tattarisuon alueella Helsingissä. Musta kolmio osoittaa CMP-luotauksen sijainnin. Punaisella pisteellä on osoitettu tutkaulinjalle referenssinä käytetyt tutkimuspisteet ja sinisellä pisteellä pohjaveden tarkkailupiste. Aineistot: GTK® ja Maanmittauslaitos®

Tattarisuon pohjavesialue sijaitsee Koillis-Helsingissä, Suurmetsän kaupunginosassa. Pohjavesialue rajautuu pohjoisessa Puistolan pientaloalueeseen, idässä Jakomäen asuinalueeseen, etelässä Porvoonväylään ja lännessä Tattarisuon teollisuusalueeseen (kuva 15). Tattarisuon pohjavesialue on ensimmäisen luokan pohjavesialue, pinta-alaltaan 1,26 km² (avoin tieto SYKE). Pohjaveden muodostumisalueen pinta-ala on 0,53 km² ja pohjaveden antoisuudeksi on arvioitu 1200 m³/d (Eskelinen 2003). Laadultaan pohjavesi on alueella heikkoa (avoin tieto SYKE). Alueen eteläosassa on käytöstä poistettu vedenottamo (Piilo 1999). Vedenottamon läheisyydessä

sijaitsee pohjavettä purkava lähteikkö (Helsingin kaupungin karttapalvelu 20.11.2019). Alueella on aikoinaan ollut paljon soranottoa ja sorakuoppia on myöhemmin täytetty (Piilo 1999).

4.3.1. Geologia

Tattarisuon pohjavesialue on muodostunut viimeisen jääkauden perääntymisvaiheessa pohjoiseteläsuuntaiseen ruhjevyöhykkeeseen (Piilo 1999). Muodostuma on tulkittu joko pitkittäisharjuksi (Piilo 1999) tai reunamuodostumaksi (Eskelinen 2003 ja avoin tieto SYKE). Alueen paleoproterotsooinen kallioperä jakautuu pohjoiseteläsuunnassa idän graniittiin ja lännen kvartsi-maasälpägneisiin (GTK hakutietokanta 20.11.2019). Maaperä pohjavesialueella on pääosin hiekkaa ja soraista hiekkaa. Muodostuman länsipuolella on laaja saviesiintymä, joka yltää pohjavesialueen länsiosiin muodostaen orsivesiä. Lähteikön alueella on myös turve-esiintymiä (Helsingin kaupungin karttapalvelu 20.11.2019). Alueella on paikoin paljon täyttömaata meluvallissa, vedenottamon huoltoreitillä sekä muilla pienemmillä kevyenliikenteen väylillä.

4.3.2. Maatutkalinjat

Tattarisuon pohjavesialueella tehtiin maatutkaluotauksia kolmessa otteessa kesällä 2019. Alueella tehtiin kaksi profiililuotauslinjaa (Kuva 15) käyttäen 50 MHz:n 100 MHz:n ja 270 MHz:n antennitaajuuksia. Kummaltakin profiililinjalta tehtiin omat CMP-luotaukset 80 MHz:n antennilla. CMP-luotauskohdat valittiin kohtiin, joissa profiililinjojen perusteella oli selkeät horisontaaliset kerrosrajat ja epäiltiin pohjavedenpinnan olevan tulkittavissa niistä. Luotauslinja 1 kulkee Tattariharjuntien suuntaisesti kohti Alppikylän asuinalueita. Luotauslinja 2 kulkee pohjavedenottamolta alittaen Porvoonväylän ja kohti Tattariharjuntietä.

4.3.3. Referenssiaineistot

Tattarisuolta on olemassa hyvin Helsingin kaupungin tuottamaa referenssiaineistoa (Kuva 15). Osa referenssikairauksista on Patolan tapaan hyvin vanhoja, mutta myös uudempaa aineistoa oli saatavilla luotauslinjojen läheisyydessä. Lisäksi saatiin päivitettyä tietoa pohjavedenpinnan tasosta. Luotauslinjan 1 referenssit on esitelty taulukossa 6 ja luotauslinjan 2 referenssit taulukossa 7.

Taulukko 6. Luotauslinjan 1 referenssiaineistot. Täyttökerroksen (Tä) alla on joko savea (Sa) tai soraista hiekkaa (SrHk). Syvemmällä maakerroksissa esiintyy hiekkaa (Hk), kivistä hiekkaa (KiHk), moreenia (Mr), kivistä moreenia (KiMr) sekä kallio (Ka) tai kiviä (Ki). Sulkeissa on ilmoitettu luotauslinjalla lähin piste luettuna linjan alusta päin. Luotauslinjan referenssit on havainnollistettu kuvaan 15.

Linja 1

Referenssi 1 (124 m)

Maalaji	Syvyys (m)
Tä	0 - 1,2
Sa	1,2 - 5,7
Hk	5,7 - 19,6
Mr	19,6 -

Referenssi 2 (143 m)

Maalaji	Syvyys (m)
Tä	0 - 1,4
Sa	1,4 - 2,2
Hk	2,2 - 5,7
Ka/Ki	5,7 -

Referenssi 3 (303 m)

Maalaji	Syvyys (m)
Tä	0 - 0,5
srHk	0,5 - 3,8
kiHk	3,8 - 6,2
srHk	6,2 - 9,1
srHk	9,1 - 12,3
srHk	12,3 - 14,5
kiMr	14,5 -

Pohjavesi 18,4 m mpy (92 m)

Ref.nro	Syvyys (m)
1	1,1
2	1,5
3	4,6

Taulukko 7. Luotauslinjan 2 referenssiaineistot. Täyttökerroksen (Tä) alla on hiekkaa (Hk) tai savea (Sa). Syvemmissä kerroksissa on lisäksi siltistä hiekkaa (SiHk) ja kallio (Ka) tai kiviä (Ki). Sulkeissa on ilmoitettu luotauslinjalla lähin piste luettuna linjan alusta päin. Luotauslinjan referenssit on havainnollistettu kuvaan 15.

Linja 2

Referenssi 1 (40 m)

Maalaji	Syvyys (m)
Tä	0 - 1,7
Tä	1,7 - 3,8
Hk	3,8 - 6,4
Sa	6,4 - 9,6
SiHk	9,6 - 14,4
SiHk	14,4 -

Referenssi 2 (100 m)

Maalaji	Syvyys (m)
Tä	0 - 0,4
Hk	0,4 - 2,9
Hk	2,9 -

Referenssi 3 (306 m)

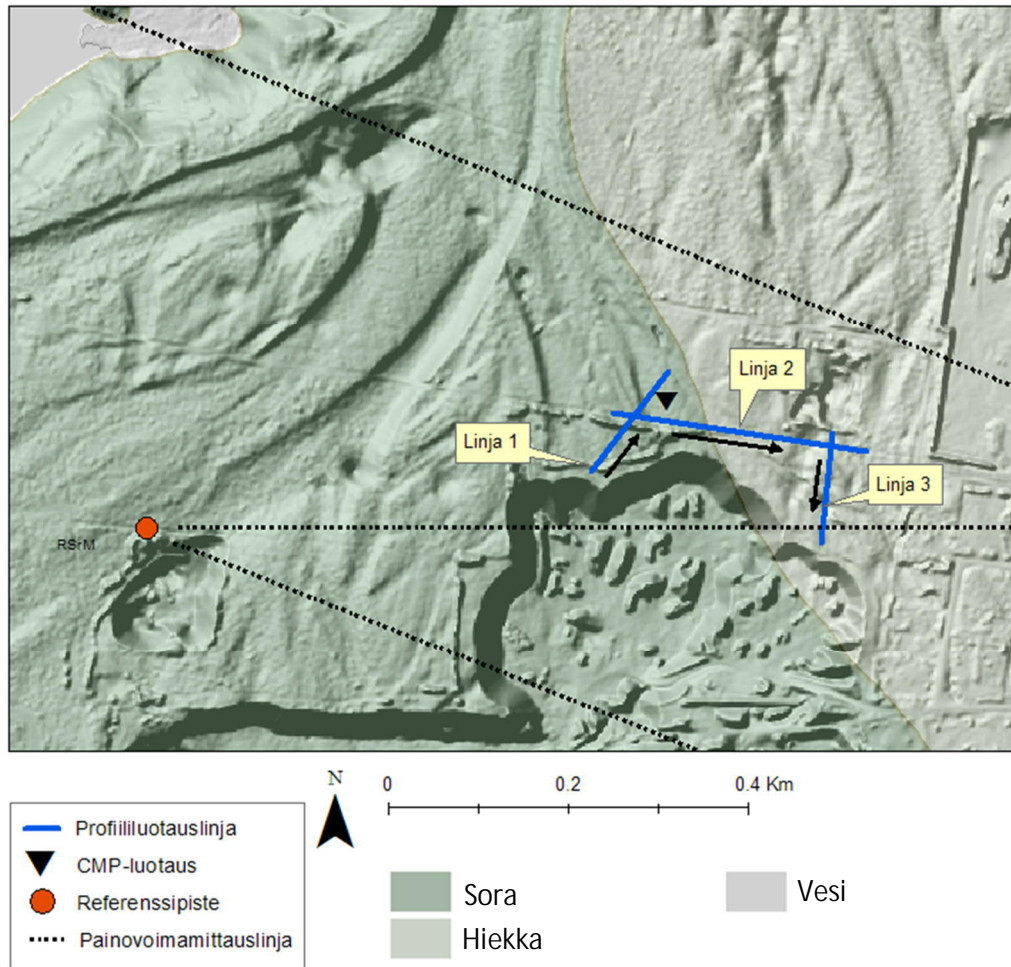
Maalaji	Syvyys (m)
Tä	0 - 1,4
Sa	1,4 - 2,2
Hk	2,2 - 5,7
Ka/Ki	5,7 -

Pohjavesi 18,4 m mpy. (100 m)

Ref.nro	Syvyys (m)
1	2,9
2	4,2
3	1,3

Täyttökerroksen paksuus alueella vaihtelee suuresti 0,4–1,7 metrin välillä riippuen referenssikohdasta. Täytön alapuolella on joko hiekka- (Hk) tai savikerros (Sa). Savikerrosten yhteydessä esiintyy myös orsivesiä (Helsingin kaupungin karttapalvelu 25.11.2019). Referenssien perusteella syvemmissä maaperän kerroksissa on myös moreenia (Mr).

4.4. Hollolan deltamuodostuma



Kuva 16. Luotauslinjojen sijainnit Hollolan deltamuodostumalla. Musta kolmio osoittaa CMP-luotauksen sijainnin. Punaisella pisteellä on osoitettu tutkaulinjalle referenssinä käytetyt tutkimuspisteet. Mustilla katkoviivoilla on esitetty painovoimamittauslinjojen sijainnit alueella. Aineistot: GTK® ja Maanmittauslaitos ®

Hollolan maatutkauskohde sijaitsee noin 7 km päässä Hollolasta länteen Kukonkoivun alueella. Hollolan delta on osa Sairakkalan deltakokonaisuutta, joka puolestaan liittyy ensimmäisen Salpauselän reunamuodostumaan (avoin tieto SYKE). Hollolan tutkimuskohde sijaitsi Hollolan Sora OY:n soranottoaikalla (Kuva 16). Tutkimusalue sijaitsee Kukonkoivu-Hatsina pohjavesialueella, joka on ensimmäisen luokan pohjavesialue. Pohjavesialueen koko on 61,09 km² ja muodostumisalue 48,84 km². Pohjavettä alueella muodostuu 45000 m³/d. Kukonkoivu-Hatsina pohjavesialue on yksi Suomen suurimpia pohjavesiesiintymiä (avoin tieto SYKE).

4.4.1. *Geologia*

Hollolan maatutkaluotauskohde sijaitsee ensimmäisen Salpausselän deltamuodostumassa. Kallioperä alueella on paleoproterotsooista granodioriittia (GTK Hakkutietokanta 20.11.2019). Maaperä alueella on soraa (Sr) ja syvemmillä muodostumassa hiekkaa (Hk) (Ahonen et al. 2011). Sorakerrosten koostumus muuttuu deltan rakenteen mukaan. Päälimmäinen topset-kerros on kivistä soraa mikä vaihtuu hiekkaisemmaksi soraksi foreset-kerroksessa. Topset-kerroksen paksuus vaihtelee alueella virranneiden sulamisvesiuomien (Kuva 16) erodoivan vaikutuksen vuoksi sekä alueen soranoton vaikutuksesta. Foreset-kerroksen edetessä vaihtuu maalaji hiekaksi. Tutkauskohteessa pohjaveden pinta noudattaa 132 metrin (mpy) korkeuskäyrää (Ahonen et al. 2011 ja Hollolan Sora Oy) mikä muuntuu noin 24–27 metrin syvyyteen maankamaran pinnasta.

4.4.2. *Maatutkalinjat*

Tähän työhön uutena aineistona tuotettiin 40 MHz:n antennilla tehty CMP-luotaus. Profiililuotaukset tehtiin kesällä 2018 käyttäen 30 MHz:n ja 100 MHz:n antennitaajuuksia. Tähän työhön valittiin näistä kolme toisiaan osittain risteävää profiililuotauslinjaa. CMP-luotaus tehtiin helmikuussa 2019 ja luotaus tehtiin profiililinjoiden 1 ja 2 läheisyydestä. Luotauslinjat sijaitsivat soranottokuopan reunan tuntumassa (kuva 16).

4.4.3. *Referenssiaineistot*

Hollolassa luotauslinjat sijaitsivat aivan soranottoaikan romahtaneen seinämän päällä, josta saatiin hyvin mitattua näkyvillä olevien kerrosten paksuudet. Muut referenssit alueelta ovat soranottoaikalla mitatut pohjavedenpinnan taso sekä suurempana kokonaisuutena tutkimusaineisto Kukonkoivu-Hatsina pohjavesialueesta löytyvä kairaus- ja painovoimamittausaineisto vuodelta 2009. Referenssien ja silmämääräisen arvion mukaan topset-kerros on kivistä soraa (KiSr), joka vaihteli klastikannatteisen ja matriisikannatteisen välillä hieman paikasta riippuen. Foreset-kerros puolestaan oli hieman hienompaa hiekaista soraa (HkSr). Referenssiaineiston perusteella pohjavedenpinnantason alapuolella maa-aines on hiekkaa (Hk) kallion tasoon asti. Referenssit on esitelty taulukossa 8.

Taulukko 8. Hollolan deltamuodostuman referenssitaset ja referenssityypit. Pintakerros alueella on kivistä soraa (KiSr), jonka alla on hiekkaista soraa (HkSr). Syvemmällä kerroksissa on hiekkaa (Hk), joka päättyy kallioon (Ka). Syvyydet vaihtelevat hieman paikasta riippuen. Alueen referenssit on havainnollistettu kuvaan 16.

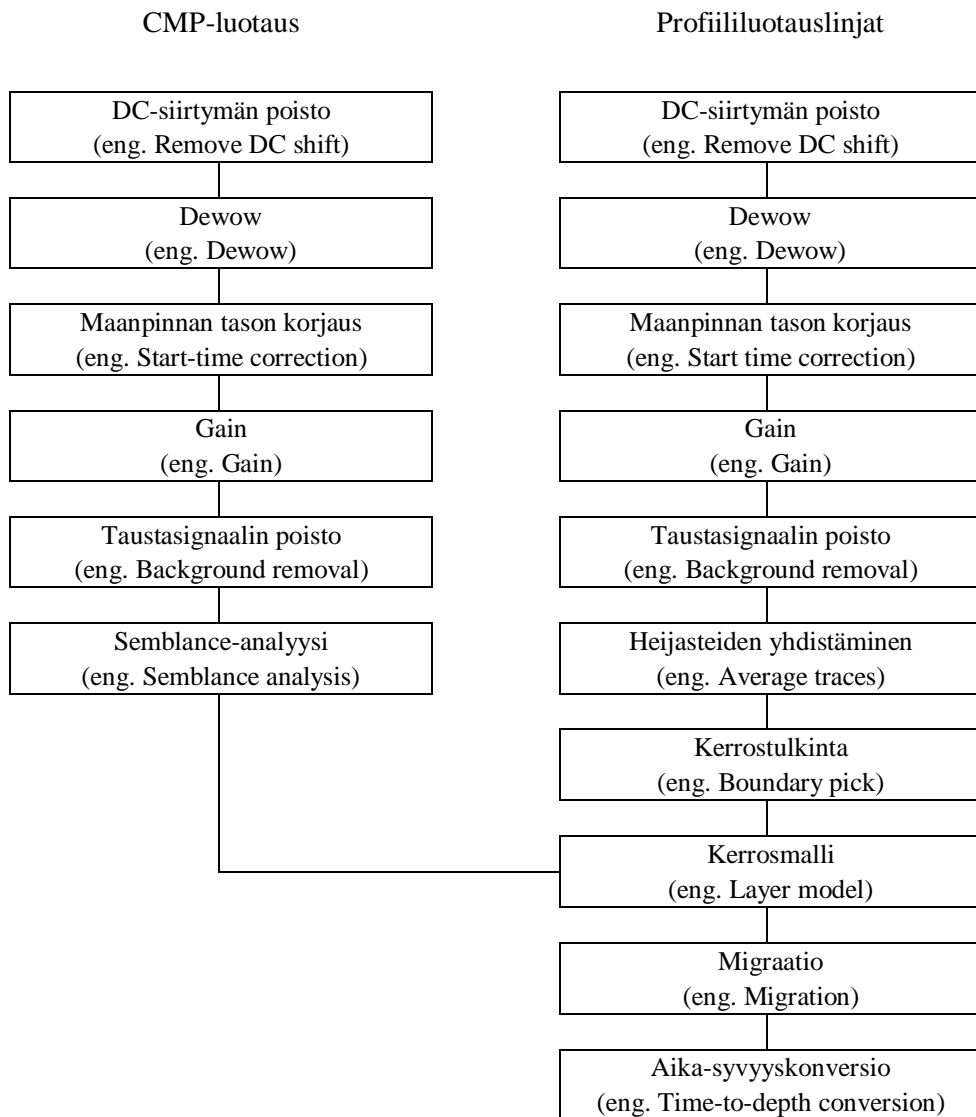
Referenssit

Maalaji	Syvyys (m)	Referenssi
KiSr	0 - 6	Silmämääräinen arvio, mittanauhalla mitattu, referenssikairaukset
HkSr	5 - 28	Mitattu pohjavedenpinnan taso, painovoimamittaukset, referenssikairaukset
Hk	28 - 60	Mitattu pohjavedenpinnan taso, painovoimamittaukset, referenssikairaukset
Ka	60 -	painovoimamittaukset, referenssikairaukset

5. AINEISTON PROSESSOINTI

Maatutka-aineistot käsiteltiin Sandmeier Geophysical Researchin ReflexW-signaalinkäsittelyohjelmalla (www.sandmeier-geo.de/index.html). Ohjelmalla pystytään käsittelemään niin maatutkan profiililinjat kuin CMP-aineistot. Prosessoinnin vaiheet pyrittiin pitämään minimissä ja tehtiin vain tarvittava tutkimuksen ja linjojen tulkinnan kannalta. Prosessoinnin vaiheet on esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9. Maatutkalinjojen prosessoinnin vaiheet.



5.1. Profiililinjat

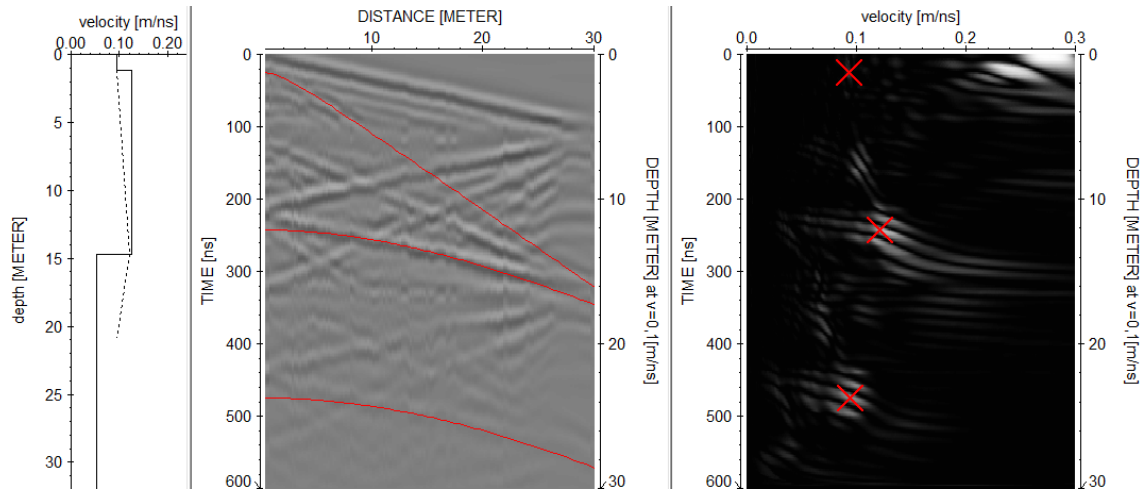
Maatutkalinjojen prosessointi aloitettiin tarkastelemalla ensin raakadataa ja arvioimalla luotausten onnistumista. Lisäksi varmistettiin, että kaikki linjan tiedot täsmäävät kunkin kohteen tietoihin ja käytettyyn antenniin. Lisäksi Patolan aineistoissa jouduttiin käyttämään profiililuotauksissa useamman luotauslinjan yhdistämistä yhdeksi profiiliaineistoksi.

Profiililinjat käsiteltiin kohteittain pyrkien saamaan oleelliset piirteet esille kerrosten tulkintaa varten. Osa aineistosta oli hyvinkin selkeää ja osa hankalammin tulkittavissa. Aineiston siistimisen jälkeen profiililinoista tulkittiin kaikki näkyvät rajapinnat. Luotauslinjoja prosessoitaessa tehtiin vain tulkinnan ja tutkimuksen kannalta oleelliset prosessointivaiheet. Esimerkiksi maanpinnan korkeusvaihteluja ei linjoille mallinnettu, vaikka tavallisesti tämä on oleellinen osa geologisen luotautiedon tuottamisessa.

5.2. CMP-linjat

CMP-linjat prosessoitiin ja analysoitiin ennen profiililinoja, jonka jälkeen CMP-tulokset jätettiin odottamaan kerrosmallin luomista. CMP-luotauksen prosessointi pidettiin melko yksinkertaisena eikä välivaiheita tullut montaa. Suurin hankaluus CMP-linjojen prosessoinnissa oli yrittää häivyttää häiriösignaaleja kuitenkin menettämättä samalla mitään oleellista. Häiriösignaaleja saatiin häivytettyä esimerkiksi käyttäen tajuussuodatusta (eng. bandpass filtering) sekä taustasignaalin poistolla (eng. Background removal). Semblance-analyysissä CMP-aineistosta pyrittiin löytämään selkeitä rajapintoja ja nopeuksia, joita voitaisiin hyödyntää kerrosmallia tehtäessä. Semblance-analyysillä saatuja nopeuksia käytettiin sellaisenaan kerrosmallia tehtäessä.

Semblance-analyysin avulla poimitaan prosessoidulta CMP-linjalta (Kuva 17B) heijasteiden RMS (Root Mean Square) -nopeudet, jotka signaalinkäsittelyohjelma esittää kerrosnopeuden ja ajan suhteen RMS-nopeusprofiililla (Kuva 17C) (Annan 2005). Selkeimmät profiililinjan heijasteet näkyvät voimakkaammin kuin heikot heijasteet. Tämän jälkeen käyttäjän päätettäväksi jää miltä kohdista kuvaajaa halutaan yksittäiset kerrosnopeudet laskea. Selkein tapa päättää yksittäisten kerrosten kohdat on valita silmämääräisesti profiililinjan (Kuva 17B) ja kuvan 17C kuvaajan perusteella selkeimmät kohdat yksittäisten kerrosnopeuksien laskemiselle. Signaalinkäsittelyohjelma laskee valituista nopeuksista Dix:n kaavaa käyttäen laskennalliset kerrosnopeudet yksittäisille kerroksille (Kuva 17A). Näitä nopeuksia voidaan käyttää sellaisenaan kerrosmallia luotaessa (Annan 2005). Kuvassa 17 on esimerkki prosessoidun CMP-luotauksen semblance-analyysistä.



Kuva 17. CMP-profiilin nopeusanalyysi semblance-analyysin avulla. (A) Dix:n kaavalla lasketut yksittäisten kerrosten nopeudet RMS-nopeuksien perusteella. (B) CMP-luotausprofiili, johon on tulkittu selkeimpien rajapintojen tuottamat signaalit. (C) CMP-luotausprofiilin perusteella poimitut RMS-nopeudet. Voimakkaimmat rajapinnat voidaan nähdä selkeästi RMS-nopeusprofiililla (punaiset ristit).








5.3. Kerrosmallit

Kerrosmalliin valittiin rajapinnat, joiden katsottiin kuvastavan CMP-aineistoilla saatuja tuloksia. Kerrokset olivat joko suoraan CMP-luotauslinjan kohdalla tai muuten yksilöitävissä samanlaiseksi kerrokseksi kuin CMP-luotauslinjan alapuoliset kerrokset olivat. Kerrosmallin ulkopuolelle jätettiin kaikki ne kerrokset, joista ei ollut nopeustietoa CMP-luotauksella saatavissa. Semblance-analyysin kerrosnopeudet siirrettiin tulkituille rajapinnoille, jolloin käsittelyohjelma muodostaa nopeuksia hyödyntäen kerrosmallin.

6. TULOKSET JA TULKINTA

Tulokset ja tulkinta -osiossa tarkastellaan tämän työn puitteissa kerättyjä aineistoja ja kohteista saatavilla olevia referenssiaineistoja kohde kerrallaan. Ensin esitellään prosessoidut maatulkauskaprofiilit sekä niiltä tulkitut jatkuvat rajapinnat. Rajapintojen tulkinnessa on hyödynnetty kaikkia käytössä olleita antennitaajuuksia, mutta ainoastaan tulkinnan kannalta keskeisimmät profiilit on esitetty tässä osiossa. Kaikki prosessoidut profiilit löytyvät liitteistä. Tämän jälkeen esitetään CMP-luotauksella saadut tulokset. Kerrosmallit -osiossa tarkastellaan tulkittuja rajapintoja 0,1 m/ns:n keskinopeudella (yleisimmin käytetty nopeusarvio, mikäli ei ole tarkkaa nopeutta tiedossa) ja lisäksi CMP-aineistolla tuotetun nopeusanalyysin avulla. Tulosten tulkinnessa verrataan kerrosmalleilla saatuja tuloksia alueen referenssiaineistoihin. Tulkinnessa tarkastellaan eri nopeusanalyysimenetelmillä saatuja nopeuksia ja pohditaan niiden suhteita. Lopuksi pohditaan mahdollisia epävarmuustekijöitä kussakin kohteessa. Tuloksia esitetään kuvin ja taulukoin. Aineiston esittämisen selkeyttämiseksi on hyödynnetty taulukon 10 symboleja.

Taulukko 10. Tulosten tarkastelua selkeyttämään käytetyt symbolit.

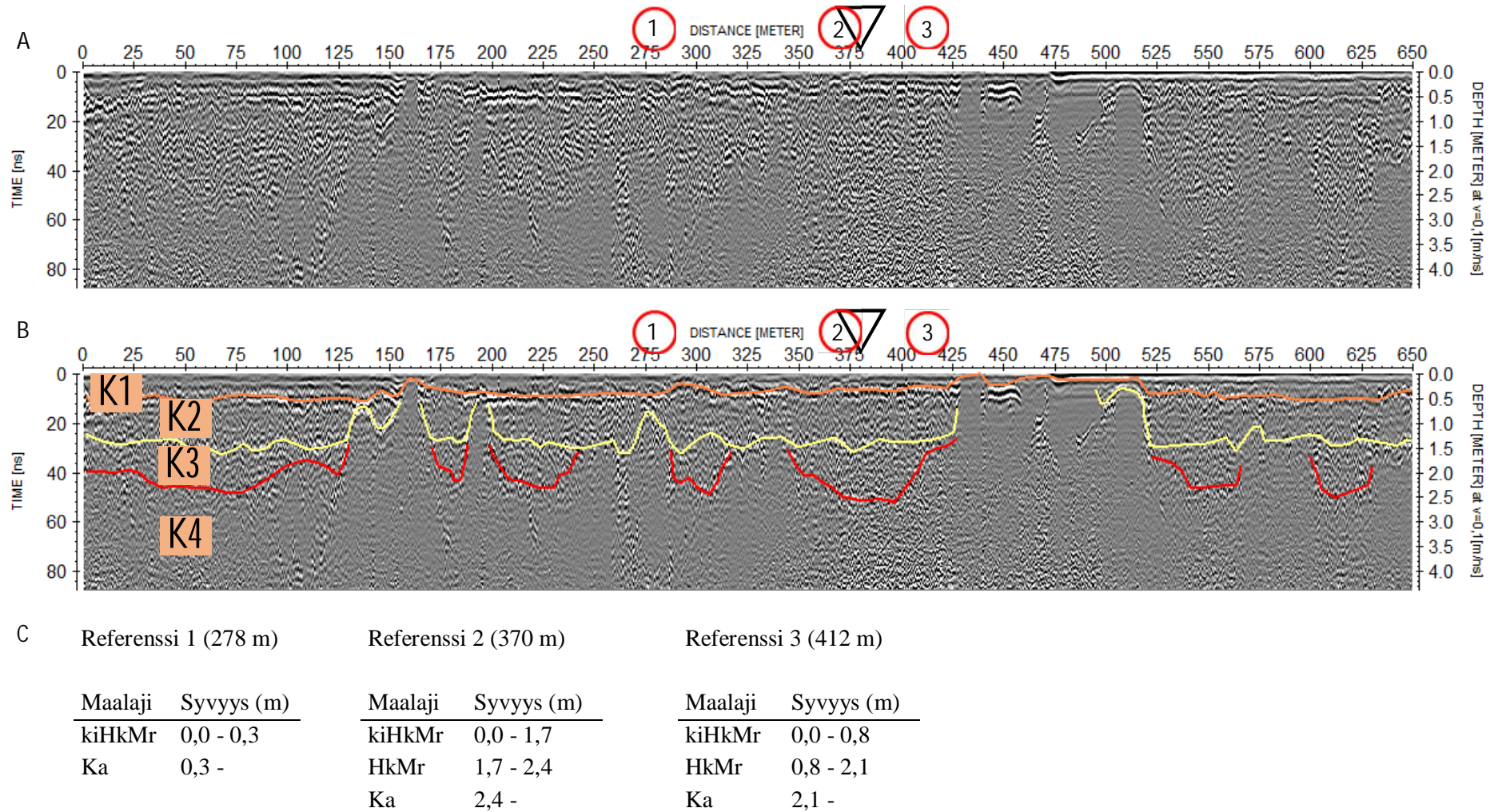
Symboli	Selite
	Kairausreferenssi (referenssi numero)
	Pohjavedenpinnan referenssi
	CMP-luotauksen sijainti
	Risteävä luotauslinja (risteävän linjan numero)
	Semblance-analyysillä tuotettu nopeus (kerrosnopeus)
	Tulkittu kerros (kerroksen järjestysluku)
	Referenssitaset

6.1. Patolan metsä

6.1.1. Profiililinja

Patolassa tehdystä luotauslinjasta voidaan profiililuotausten perusteella erottaa neljä kerrosta (Kuva 18). Ylin kerrosrajapinta kulkee horisontaalisesti koko luotauslinjan matkan noin 10 ns:n syvyydellä. Toinen kerrosrajapinta kulkee edellisen alla, noin 30 ns:n kohdalla, katketen kalliopaljastumien kohdilla. Kolmas kerrosrajapinta kulkee keskimäärin 40–50 ns:n kohdalla. Kolmas kerrosrajapinta katkeaa niin ikään kalliopaljastumien kohdalla. Neljännen kerroksen alapintaa ei tutkaluotauksista voitu erottaa ja oletama onkin kolmannen kerroksen alapinnan edustavan kallionpintaa. Tulossiossa on esitetty 270 MHz:n luotauslinjojen tulkinnat. 50 MHz:n ja 100 MHz:n antennin luotausresoluutio oli Patolassa liian karkea, joten saatuja tuloksia hyödynnettiin ainoastaan 270 MHz:n luotauslinjan apuna. Matalammilla taajuuksilla saatiin tietoa kallion rakopinnoista, joilla ei kuitenkaan tämän tutkimuksen kannalta ollut suurta merkitystä. Patolan prosessoitu 270 MHz:n luotauslinja, tulkitut kerrosrajapinnat sekä referenssiaineistot on esitetty kuvassa 18.

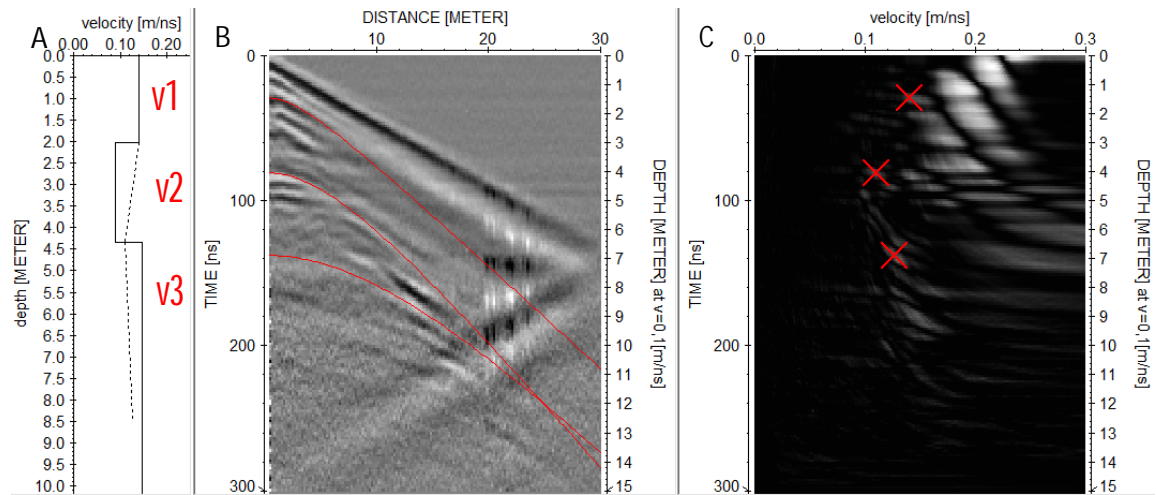
Tulkinnan mukaan päällimmäinen kerros (K1) on täyttömaata (Tä), mikä on tulkittu päättyvän oranssilla merkittyyn rajapintaan (kuva 18B). Toinen kerros (K2) on kivistä hiekkamoreenia (kiHkMr), mikä keltaisella merkityn rajapinnan jälkeen vaihtuu kolmannen kerroksen (K3) hiekkamoreeniksi (HkMr). Moreenikerrosten alla on referenssiaineistojen perusteella paikoin hyvinkin rikkonainen kallion pinta (Ka), jota profiilikuvissa on kuvattu neljäntenä kerroksena (K4).



Kuva 18. (A) Patolan prosessoitu luotauslinja. (B) Luotauslinjalta tulkitut jatkuvat kerrosrajapinnat korostettuna eri värein. (C) Tiedot luotauslinjan läheisyydessä olevien kairanreikien pohjalta tulkituista kerrospaksuuksista. Referenssipisteet on merkitty kuvaan punaisiin ympyröin. CMP-luotauskohta on merkitty kolmiolla. Kerros 1 (K1) on täyttökerros (Tä) Kerros 2 (K2) on kivistä hiekkamoreenia (kiHkMr). Kerros 3 (K3) on hiekkamoreenia (HkMr). Kerros 4 (K4) kuvastaa kalliota (Ka).

6.1.2. CMP-luotaus

CMP-luotaus on tehty profiililinjan varrelta 380 metrin kohdalta (Kuva 18). Prosessoidun CMP-aineiston perusteella tehdyn semblance-analyysin perusteella (Kuva 19A) havaittiin kolme eri kerrosnopeutta: v_1 0,140; v_2 0,090; v_3 0,147. Nopeudet on tulkittu sekä silmämääräisesti kohdistamalla (Kuva 19B) että semblance-analyysin tuottaman keskinopeuskuvaajan avulla (Kuva 19C). Tulkittu CMP-luotauksen semblance-nopeusanalyysi on esitetty kuvassa 19.



Kuva 19. (A) Semblance-analyysillä tulkitut kerrosnopeudet: v_1 0,140; v_2 0,090; v_3 0,147. (B) Prosessoitu CMP-luotauslinja, jossa tulkitut hyperbelit. (C) Tulkitut keskimääräiset kerrosnopeudet yksittäisille syvyyksille.

6.1.3. Kerrosmallit

CMP-luotauksella saadut kolme kerrosnopeutta on sijoitettu kerrosmalliin siten että kerroksille K1 ja K2 on annettu nopeus v_1 . Kerrokselle K3 on annettu v_2 ja K4:lle v_3 . K1 ja K2 kerroksen yhdistäminen on tehty, koska täyttömään kerrospaksuus luotauslinjalla on noin 0,5 metriä, mikä on hyvin lähellä vertikaalisen erotuskyvyn alarajaa 0,140 m/ns:n nopeudelle 80 MHz:n antennilla (Taulukko 1). Näin ollen CMP-luotauksella saatu v_1 nopeus ilmentää K1- ja K2-kerroksen keskinopeutta. Patolan kerrosmalli on esitetty kuvassa 20.

CMP-aineistolla tuotetun kerrosmallin täyttökerroksen paksuus vaihtelee 0,3–0,6 metrin välillä referenssipisteiden kohdalla. Kivisen hiekkamoreenin loppusyvyys vaihtelee 1,1–1,9 metrin välillä. Hiekkamoreenin ja kallion rajapinta referensseissä 2 ja 3 vaihtelee 2,2–2,9 metrin välillä.

Kerrosmallissa, jossa on käytetty 0,1 m/ns:n keskinopeutta saadaan täyttökerroksen (Tä) paksuudeksi referenssipisteiden kohdalla 0,3–0,4 metriä. Kivisen hiekkamoreenin (kiHkMr) loppusyvyys vaihtelee 0,7–1,3 metrin välillä. Referenssipisteissä 2 ja 3 syvemmälle ulottuva hiekkamoreenikerros (HkMr) päättyy kallioon (Ka) 1,7–2,4 metrin syvyydellä.

Kerrosrajojen syvyydet 0,1 m/ns keskinopeudella ja CMP-luotauksen perusteella on esitetty taulukossa 11.

Taulukko 11. Patolan kerrosrajapintojen syvyydet referenssiaineiston, 0,1 m/ns:n keskinopeuden sekä CMP-luotausaineiston perusteella.

Referenssi 1 (278m)

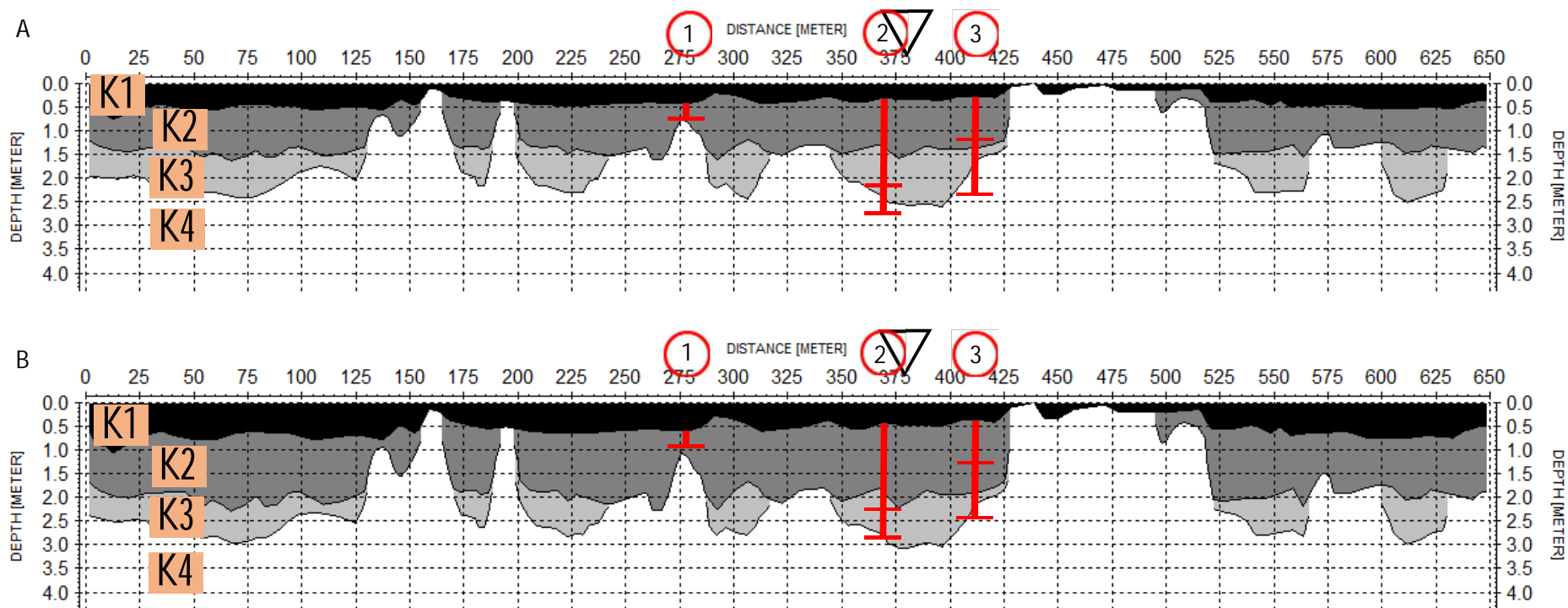
Kerrosraja	Referenssi	Kerrosrajan syvyys (m)	
		0,1 m/ns	CMP
Tä / kiHkMr	-	0,4	0,6
kiHkMr / Ka	0,3	0,7	1,1

Referenssi 2 (370m)

Kerrosraja	Referenssi	Kerrosrajan syvyys (m)	
		0,1 m/ns	CMP
Tä / kiHkMr	-	0,3	0,4
kiHkMr / HkMr	1,7	1,3	1,9
HkMr / Ka	2,4	2,4	2,9

Referenssi 3 (412m)

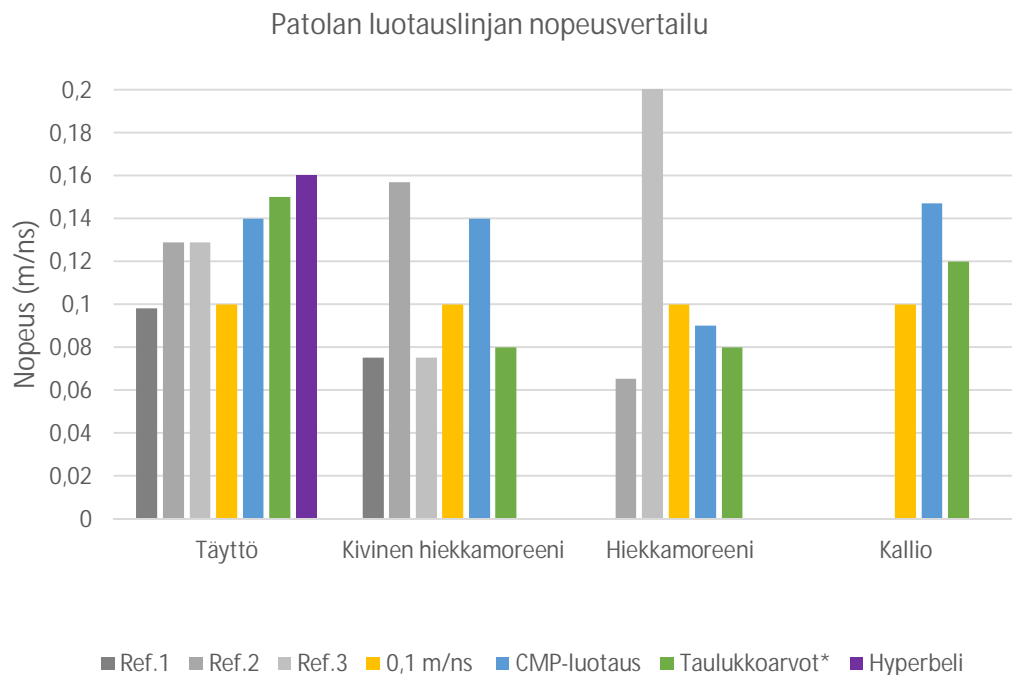
Kerrosraja	Referenssi	Kerrosrajan syvyys (m)	
		0,1 m/ns	CMP
Tä / kiHkMr	-	0,3	0,3
kiHkMr / HkMr	0,8	1,3	1,8
HkMr / Ka	2,1	1,7	2,2



Kuva 20. (A) Kerrosmalli 0,1 m/ns:n keskinopeudella määritettynä. Kerrosmallissa (B) on käytetty CMP-luotauksella saatuja nopeuksia. CMP-aineiston resoluutiotarkastelun perusteella kerrokset K1 ja K2 on yhdistetty. Kerrosmalleihin on lisätty kuvan 18C referenssiaineistojen syvyystiedot punaisiin palkein alkaen täyttökerroksen (K1) alapinnasta, koska referensseissä ei ole täyttökerroksen paksuutta ilmoitettu. Kerrosmallissa mustalla kerroksella on esitetty täyttömaan kerrospaksuus (Tä) (K1). Tummempi harmaa kuvastaa kivistä hiekkamoreenia (kiHkMr) (K2) ja vaaleampi harmaa hiekkamoreenia (HkMr) (K3). Vaalea osuus kerrosmallissa kuvaa kallioperää (Ka) (K4).

6.1.4. Tulosten tulkinta ja vertaaminen referenssiaineistoihin

Patolan tuloksia on havainnollistettu kuvaan 21. Referenssikerroksille on saatu laskennallinen kerrosnopeus vertaamalla referenssisyvyyksiä tulkittuun kerrosmalliin. Lisäksi kaaviossa esitetään yleinen keskinopeusarvio (0,1 m/ns), CMP-luotauksella saadut nopeudet sekä taulukon 2 vertailuarvoja kullekin maalajille. Patolasta saatiin myös hyperbelianalyysin perusteella kerrosnopeus täyttömaalle (0,16 m/ns), mikä on melko korkea arvo maa-ainekselle (Taulukko 2).



Kuva 21. Patolan luotauslinjan nopeusvertailu. Kaaviossa on esitetty jokaiselle alueen maalajille saadut kerrosnopeudet referenssisyvyyksien, 0,1 m/ns ja CMP-luotauksen avulla. Lisäksi taulukkoon on laitettu taulukkoarvoja kyseisille maalajeille. Patolasta saatiin myös yksi referenssinopeus täyttökerrokselle pistemäisen heijasteen hyperbelisovituksella. *Taulukkoarvoina on käytetty täytölle hiekan nopeutta 0,15 m/ns (Reynolds 1997), karkea moreeni 0,08 m/ns (Hänninen 1991) ja Graniittinen kallio 0,12 m/ns (Reynolds 1997)

Täyttökerrokselle saatiin kaikkein eniten vertailuarvoja. Arvot vaihtelevat välillä 0,098–0,160 m/ns. Referenssipisteessä 1 korreloi parhaiten 0,1 m/ns:n kerrosnopeus. Puolestaan referensseissä 2 ja 3 CMP-luotauksella saatu 0,14 m/ns:n nopeus on lähempänä. Taulukkoarvot ja niin ikään hyperbelianalyysillä saatu tulos on lähempänä CMP-luotauksen arvoa.

Kivisessä hiekkamoreenissa havaittiin paljon vaihtelua. Referenssit 1 ja 3 ovat hyvin linjassa keskenään ja hyvin lähellä taulukkoarvoja. Referenssipisteessä 2 on selkeästi poikkeava arvo muihin referensseihin verrattuna, mikä johtuu joko kerroksen tulkinnallisesta virheestä tai siitä ettei referenssipisteen kohta aivan vastaa luotauslinjan kerrospaksuuksia. CMP-luotauksella saatiin selvästi korkeampi arvo kiviselle hiekkamoreenille. Tämä voi selittyä sillä että täyttökerros ja kivinen hiekkamoreenikerros on jouduttu antennin vertikaalisen erotuskyvyn vuoksi yhdistämään ja täyttökerroksen kova kerrosnopeus on nostanut samalla kivisen hiekkamoreenin kerrosnopeutta. Jos kerroksille olisi saatu yksilöityä omat kerrosnopeudet, tarkentuisi kivisen hiekkamoreenin kerrosnopeus luultavasti lähemmäs muita vertailuarvoja. Keskiarvoinen 0,1 m/ns nopeus toimii kivisen hiekkamoreenin tapauksessa hieman paremmin verrattuna referenssiaineistolla saatuihin tuloksiin, joskin ero referensseihin on tässäkin melko suuri.

Hiekkamoreenikerrokselle ei saatu kuin kaksi arvoa referenssipisteiden avulla ja referenssin 3 kerrosnopeus oli selvästi virheellinen (0,473 m/ns). Tämä selittyy joko tulkinnallisella virheellä tai sitten referenssipisteen kerrokset eivät vastaa luotauslinjan kerroksia. CMP-luotauksella saatiin tässä kerroksessa parempi vastaavuus taulukkoarvoihin ja referensseihin verrattuna 0,1 m/ns keskinopeuteen.

Kallion kerrosnopeutta ei voitu referenssipisteiden kautta vertailla. CMP-luotauksen ja 0,1 m/ns keskiarvo poikkeavat yhtä paljon taulukkoarvosta. CMP-luotauksella saatu nopeus 0,147 m/ns on kuitenkin korkeahko nopeus kalliolle (Taulukko 2), jolloin voisi ajatella 0,1 m/ns:n keskiarvon olevan lähempänä totuutta.

6.1.5. Pohdintaa kohteen luotauksista

Patolan profiililuotauslinjojen tulkinta osoittautui hyvin haasteelliseksi monellakin tapaa. Profiililuotauksia tehtiin kesällä 2018 ja alkutalvesta 2019. Talvella 2019 Malån maatutkalaitteisto ei ollut toimintakunnossa ja luotauslinjoja tehtiin ainoastaan GSSI:n laitteistolla. Tulosten tulkinnan kannalta tärkeää oli kuitenkin 270 MHz:n profiililuotauksen ja 80 MHz:n CMP-luotauksen onnistuminen samaan aikaan. Tällä voitiin varmistaa luotausolosuhteiden pysyminen samana profiililuotausten ja nopeusanalyysin suhteen. Koska erilaiset luotausolosuhteet mahdollistavat toisistaan poikkeavien kerrosrajapintojen saannin,

hyödynnettiin Malå:n antennien aineistoja ainoastaan tulkinnan tukena. CMP-luotausaineiston käyttäminen eri olosuhteissa tehdylle profiililinjalle tuottaisi virheellisen kerrospaksuuden luotauslinjalle.

Patolan maaperä on moreenivaltaista. Ulkoilureitin päällimmäisin täyttökerros oli helposti tunnistettavissa luotauslinjoilta, mutta moreenikerrosten vaihtelu sekä rikkonaisen kallionpinnan tunnistus oli erittäin haastavaa. Tämän lisäksi tulkintaa hankaloittivat vanhahkot referenssiaineistot. Referenssiaineistot on kairattu vuonna 1969, eikä tarkkaa tietoa ole siitä missä kunnossa nykyinen ulkoilureitti tuolloin on ollut. Sama reitti on ollut käytössä jo vuonna 1969, mutta ainakaan luotauslinjoilta löydettyä täyttömäärää ei vuonna 1969 ole referenssipisteissä ollut. Lisäksi vanhoja referenssipisteitä hyödynnettäessä ei voida olla täysin varmoja referenssien tarkasta sijainnista suhteessa luotauslinjaan. Uudempien referenssiaineistojen noin 0,35 metrin täyttökerroksen paksuus näyttäisi toimivan myös tulkitulle profiililinjalle.

Patolassa onnistuttiin hyödyntämään samojen olosuhteiden vallitessa 270 MHz:n antennia sekä CMP-luotauksen laitteistoa, mikä on tulosten oikeellisuuden kannalta hyvin oleellista. Referenssiaineistojen tuoma epävarmuus sekä profiililuotauslinjojen haastava tulkinta kuitenkin tuottavat epävarmuutta tässä kohteessa. Harmittavaa oli myös CMP-luotauksessa käytetyn 80 MHz:n antennin vertikaalinen erotuskyky, jolla ei voitu yksilöimään täyttökerroksen radioaallon kulkunopeutta, jolloin tulokset olisivat voineet olla paremmat.

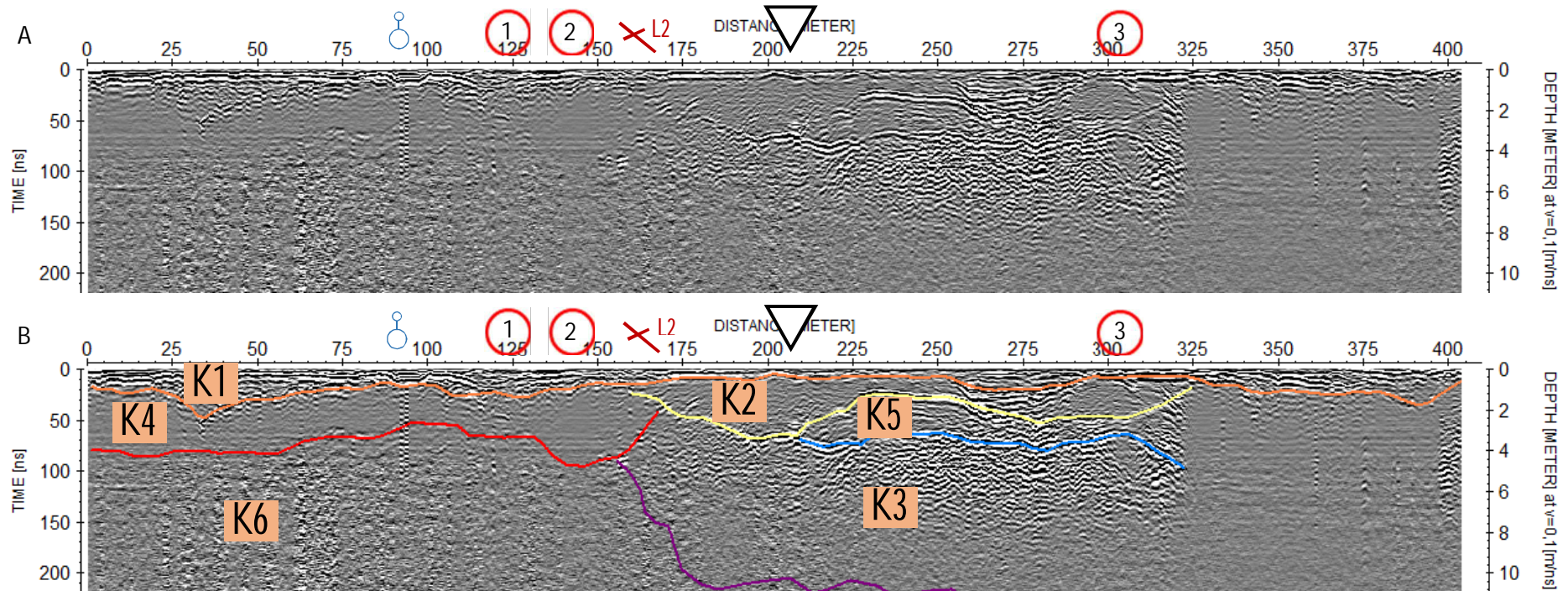
6.2. Tattarisuon pohjavesialue

6.2.1. Profiililinjat

Linja 1 osoittautui haasteelliseksi tulkittavaksi useiden kerrosten vuoksi ja apuna kerrosten tulkinnassa hyödynnettiin niin referenssiaineistoja kuin rinnakkaisia antennitaajuuksia. CMP-luotaus tehtiin profiililinjan alusta katsottuna 206 metrin kohdalta (Kuva.22). CMP-luotauksella tulkittiin neljä eri kerrosta, joista viimeiselle ei löydetty profiililuotauksilla ala rajaa. Lisäksi luotauslinjan alkupäässä (0–160 m) on referenssiaineistojen perusteella savilinssi. Savilinssin

lisäksi 210–320 metrin välissä on tulkittu kerrosten 2 ja 3 väliin sijoittuva hiekkainen linssi. Neljänteen kerrokseen pystytettiin 100 MHz:n ja 50 MHz:n antennien perusteella tulkitsemaan hajanaisia rajoja, mutta yhtenäistä kerroksen päättävää rajaa ei pystytty tulkitsemaan. Tulkitut rajapinnat on esitetty 270 MHz:n antennin osalta kuvassa 22 ja 100 MHz antennin osalta kuvassa 23.

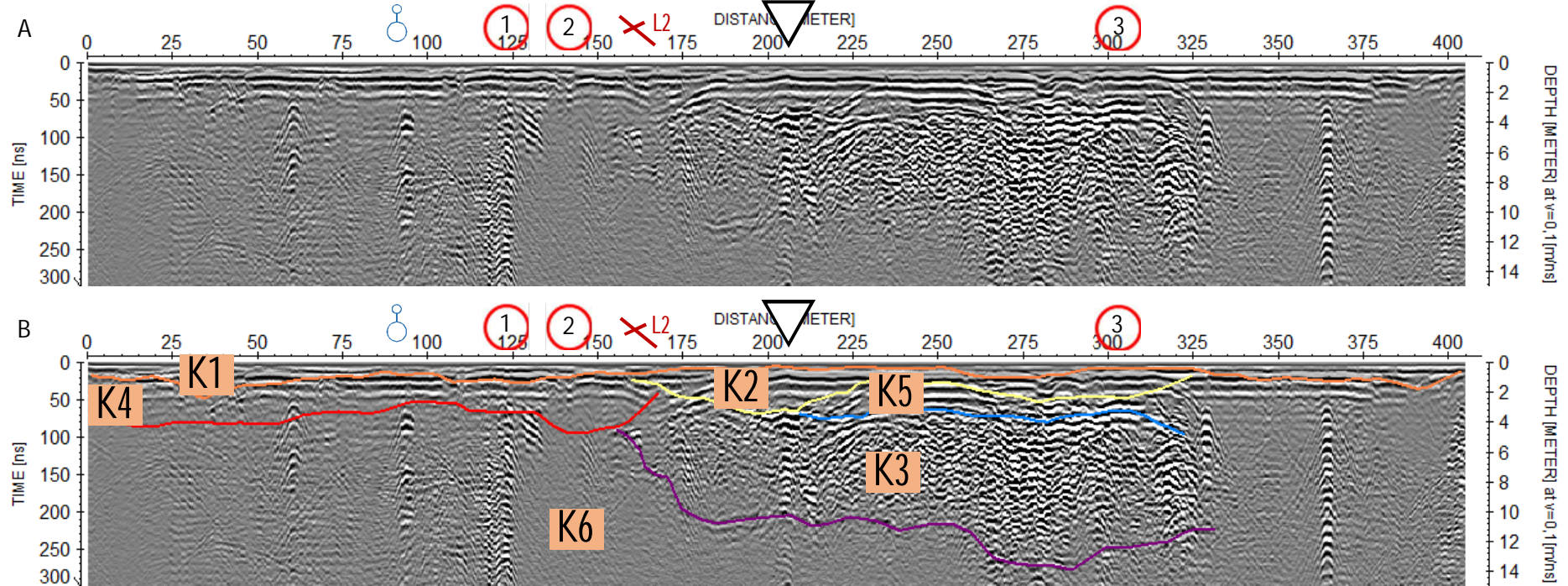
Luotauslinja 2 oli huomattavasti selkeämpi kerrosten tulkinnan osalta. Rajapinnat pystytettiin tulkitsemaan hyvin 270 MHz:n ja 100 MHz:n antennin yhteistulkinnalla. CMP-luotauspisteen (Kuvan 24 kohdasta 50 metriä) kohdalta tulkittiin neljä kerrosta, josta viimeisimmän alarajaa ei voitu määrittää. Luotauslinjan 2 tulkitut kerrosrajat on esitetty kuvassa 24 (100 MHz).



C Linja 1

Referenssi 1 (124 m)		Referenssi 2 (143 m)		Referenssi 3 (303 m)		Pohjavesi 18,4 mpy (92 m)	
Maalaji	Syvyys (m)	Maalaji	Syvyys (m)	Maalaji	Syvyys (m)	Ref.nro	Syvyys (m)
Tä	0 - 1,2	Tä	0 - 1,4	Tä	0 - 0,5	1	1,1
Sa	1,2 - 5,7	Sa	1,4 - 2,2	SrHk	0,5 - 3,8	2	1,5
Hk	5,7 - 19,6	Hk	2,2 - 5,7	KiHk	3,8 - 6,2	3	4,6
Mr	19,6 -	Ka/Ki	5,7 -	SrHk	6,2 - 14,5		
				KiMr	14,5 -		

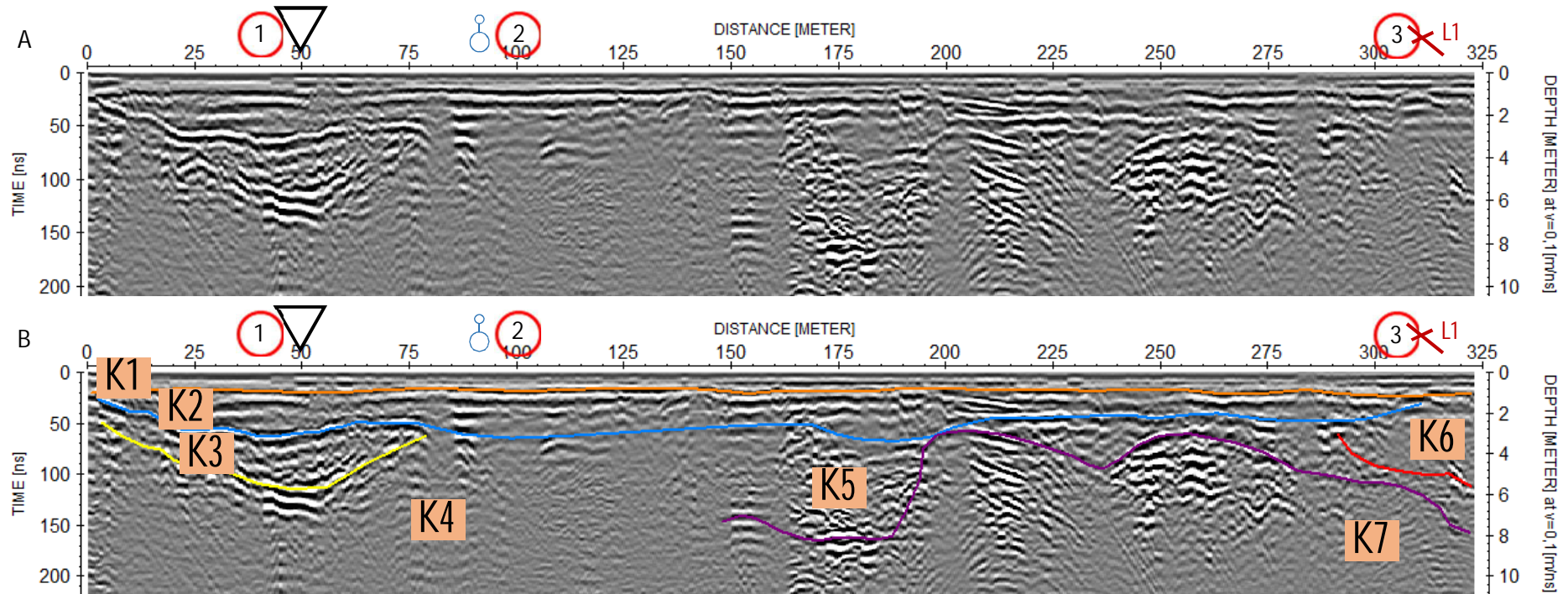
Kuva 22. (A) Tattarisuon 270 MHz:n prosessoitu luotauslinja 1. (B) Luotauslinjalta tulkitut jatkuvat kerrosrajapinnat korostettuna eri värein. (C) Tiedot luotauslinjan läheisyydessä olevien kairanreikien pohjalta tulkituista kerrospaksuuksista. Kerros 1 (K1) on täyttömaata (Tä). Kerros 2 (K2) on soraista hiekkaa (SrHk). Kerros 3 (K3) on soraista hiekkaa. Kerros 4 (K4) on savilinssi (Sa). Kerros 5 (K5) on linssimäinen kivinen hiekka (KiHk). Kerros 6 (K6) on mahdollisesti kalliota (ka). Referenssien sijainnit on merkitty punaisin ympyröin, pohjavesiputki sinisellä symbolilla, leikkaava luotauslinja ristillä ja CMP-luotauskohta kolmiolla.



Linja 1		Referenssi 1 (124 m)		Referenssi 2 (143 m)		Referenssi 3 (303 m)		Pohjavesi 18,4 mpy (92 m)	
Maalaji	Syvyys (m)	Maalaji	Syvyys (m)	Maalaji	Syvyys (m)	Maalaji	Syvyys (m)	Ref.nro	Syvyys (m)
Tä	0 - 1,2	Tä	0 - 1,4	Tä	0 - 0,5			1	1,1
Sa	1,2 - 5,7	Sa	1,4 - 2,2	SrHk	0,5 - 3,8			2	1,5
Hk	5,7 - 19,6	Hk	2,2 - 5,7	KiHk	3,8 - 6,2			3	4,6
Mr	19,6 -	Ka/Ki	5,7 -	SrHk	6,2 - 14,5				
				KiMr	14,5 -				

Kuva

23. (A) Tattarisuon 100 MHz:n prosessoitu luotauslinja 1. (B) Luotauslinjalta tulkitut jatkuvat kerrosrajapinnat korostettuna eri värein. (C) Tiedot luotauslinjan läheisyydessä olevien kairanreikien pohjalta tulkituista kerrospaksuuksista. Kerros 1 (K1) on täyttömaata (Tä). Kerros 2 (K2) on soraista hiekkaa (SrHk). Kerros 3 (K3) on soraista hiekkaa. Kerros 4 (K4) on savilinssi (Sa). Kerros 5 (K5) on linssimäinen kivinen hiekka (KiHk). Kerros 6 (K6) on kalliota (Ka). Referenssien sijainnit on merkitty punaisiin ympyröihin, pohjavesiputki sinisellä symbolilla, leikkaava luotauslinja ristillä ja CMP-luotauskohta kolmiolla.



Linja 2

C

Referenssi 1 (40 m)

Referenssi 2 (100 m)

Referenssi 3 (306 m)

Pohjavesi 18,4 mpy (100 m)

Maalaji	Syvyys (m)
Tä	0 - 1,7
Tä	1,7 - 3,8
Hk	3,8 - 6,4
Sa	6,4 - 9,6
SiHk	9,6 - 14,4
SiHk	14,4 -

Maalaji	Syvyys (m)
Tä	0 - 0,4
Hk	0,4 - 2,9
Hk	2,9 -

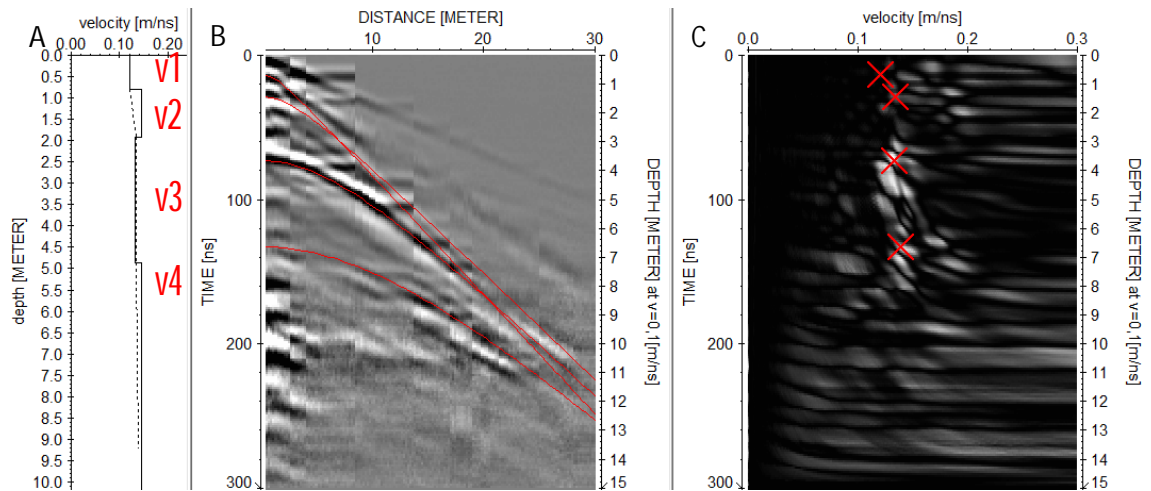
Maalaji	Syvyys (m)
Tä	0 - 1,4
Sa	1,4 - 2,2
Hk	2,2 - 5,7
Ka/Ki	5,7 -

Ref.nro	Syvyys (m)
1	2,9
2	4,2
3	1,3

Kuva 24. (A) Tattarisuon 100 MHz:n prosessoitu luotauslinja 2. (B) Luotauslinjalta tulkitut jatkuvat kerrosrajapinnat korostettuna eri värein. (C) Tiedot luotauslinjan läheisyydessä olevien kairanreikien pohjalta tulkituista kerrospaksuuksista. Kerros 1 (K1) on täyttömaata (Tä). Kerros 2 (K2) on täyttömaata tai hiekkaa (Tä / Hk). Kerros 3 (K3) on hiekkaa. Kerros 4 (K4) on savea (Sa). Kerros 5 (K5) on hiekkaa. Kerros 6 (K6) on savilinssi (Sa). Kerros 7 (K7) on mahdollisesti kalliota (Ka). Referenssien sijainnit on merkitty punaisiin ympyröihin, pohjavesiputki sinisellä symbolilla, leikkaava luotauslinja ristillä ja CMP-luotauskohta kolmiolla.

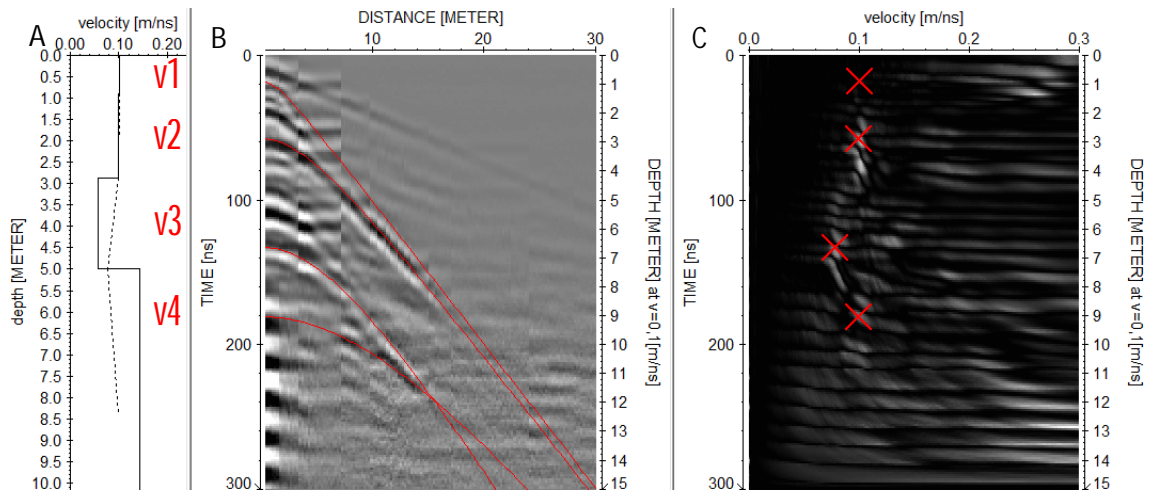
6.2.2. CMP-luotaus

Luotauslinjan 1 CMP-luotaus on tehty linjan kohdasta 206 metriä (Kuva 22A). CMP-luotauksen semblance-analyysillä erotettiin neljä eri kerrosnopeutta: v_1 0,115; v_2 0,132; v_3 0,130; v_4 0,142 (Kuva 25A). Nopeudet on tulkittu sekä silmämääräisesti kohdistamalla (Kuva 25B) että semblance-analyysin tuottaman keskinopeuskuvaajan avulla (Kuva 25C). Tulkittu CMP-luotauksen semblance-nopeusanalyysi on esitetty kuvassa 25.



Kuva 25. Tattarisuon luotauslinja 1 CMP-nopeusanalyysi. (A) Semblance-analyysillä tulkitut kerrosnopeudet: v_1 0,115; v_2 0,132; v_3 0,130; v_4 0,142. (B) Prosessoitu CMP-luotauslinja, jossa tulkitut hyperbelit. (C) Tulkitut keskimääräiset kerrosnopeudet yksittäisille syvyyksille.

Luotauslinjan 2 CMP-luotaus on tehty linjan kohdasta 50 metriä (Kuva 24A). CMP-luotauksen semblance-analyysillä erotettiin neljä eri kerrosnopeutta: v_1 0,101; v_2 0,099; v_3 0,057; v_4 0,148 (Kuva 26A). Nopeudet on tulkittu sekä silmämääräisesti kohdistamalla (Kuva 26B) että semblance-analyysin tuottaman keskinopeuskuvaajan avulla (Kuva 26C). Tulkittu CMP-luotauksen semblance-nopeusanalyysi on esitetty kuvassa 26.



Kuva 26. Tattarisuon luotauslinja 2 CMP-nopeusanalyysi. (A) Semblance-analyysillä tulkitut kerrosnopeudet: v1 0,101; v2 0,099; v3 0,057; v4 0,148. (B) Prosessoitu CMP-luotauslinja, jossa tulkitut hyperbelit. (C) Tulkitut keskimääräiset kerrosnopeudet yksittäisille syvyyksille.

6.2.3. Kerrosmallit

Luotauslinjan 1 kerrosmallissa, jossa on käytetty 0,1 m/ns keskinopeutta, saatiin täyttökerroksen (Tä) paksuudeksi 0,4–1,3 metriä referenssipisteiden kohdalle. Täyttö on paksumpaa luotauslinjan alussa ja ohenee keskivaiheen jälkeen. Referenssipisteiden 1 ja 2 kohdalla täyttökerroksen alla on savikerros. Savikerroksen alapinta on välillä 3,3–4,7 metriä. Referenssipisteen 3 kohdalla täytön jälkeen tulee sorainen hiekkakerros yltäen 2,4 metriin, minkä jälkeen kivinen hiekkakerros päättyen 3,3 metriin. Kivisen hiekan alla oleva hiekkainen sora jatkuu puolestaan aina 12,4 metriin asti.

Kerrosmallissa, missä on hyödynnetty CMP-luotauksella saatuja nopeuksia, saadaan täytön alapinnaksi 0,5–1,5 metriä. Luotauslinjan alkupään savilinssiä ei voitu CMP-luotauksella tunnistaa, joten sille ei kerrospaksuutta saatu. Referenssipisteen 3 kohdalle täytön alapuolinen sorainen hiekkakerros puolestaan päättyy 3,2 metrin syvyyteen. Kivisen hiekan alapintaa ei myöskään CMP-luotauksella saatu selvitettyä, joten seuraava tulkittavissa oleva rajapinta sijaitsee 16,4 metrin syvyydessä. Luotauslinjan 1 kerrosrajat on esitetty taulukossa 12.

Taulukko 12. Tattarisuon linjan 1 kerrosrajat tulkittuna referenssien, 0,1 m/ns ja CMP-luotauksella. Lisäksi arvioitu pohjaveden pinnan taso kunkin referenssipisteen kohdalla.

Linja 1

Referenssi 1 (124 m)

Kerrosraja	Referenssi	Kerrosrajan syvyys (m)			Pohjavesi
		0,1 m/ns	CMP		
Tä / Sa	1,2	1,3	1,5		1,1
Sa / Hk	5,7	3,3			
Hk / Mr	19,6				

Referenssi 2 (143 m)

Kerrosraja	Referenssi	Kerrosrajan syvyys (m)			Pohjavesi
		0,1 m/ns	CMP		
Tä / Sa	1,4	0,9	1,1		1,5
Sa / Hk	2,2	4,7			
Hk / Ka	5,7				

Referenssi 3 (303 m)

Kerrosraja	Referenssi	Kerrosrajan syvyys (m)			Pohjavesi
		0,1 m/ns	CMP		
Tä / SrHk	0,5	0,4	0,5		
SrHk / KiHk	3,8	2,4	3,2		4,6
KiHk / SrHk	6,2	3,3			
SrHk / KiMr	14,5	12,4	16,4		

Luotauslinjan 2 kerrosmallissa, jossa on käytetty 0,1 m/ns keskinopeutta, saatiin täyttökerroksen (Tä) paksuudeksi 0,9–1,2 metriä referenssipisteiden kohdalle. Referenssien 1 ja 2 kohdalla täytön alla on joko lisää täyttöä tai hiekkaa (Hk). Referenssipisteen 1 kohdalla on tulkittu alempi kerros täytöksi ja referenssipisteessä 2 hiekaksi. Tutkalinjalla raja näyttää yhtenevältä, joten kyse on luultavasti samasta kerroksesta. Kerroksen kaksi alaraja kulkee referenssien 1 ja 2 välillä 3,1–3,2 metrin syvyydellä. Referenssissä 1 kolmas kerros päättyy 5,5 metrin syvyyteen. Tämä kerros todennäköisesti edustaa veden kyllästämää hiekkakerrosta, joka päättyy savikerrokseen. Referenssipisteen 3 kohdalla täyttö päättyy savikerrokseen, jonka alapinta on 4,8 metrissä. Referenssin 2 kairautieto loppuu hiekkakerroksen alapintaan.

CMP-kerrosmallissa ensimmäisen kerroksen paksuus vaihtelee välillä 1,0–1,3 metriä. Referenssipisteiden 1 ja 2 välillä toisen kerroksen alapinnan syvyys vaihtelee 3,2 ja 3,3 metrin välillä. Referenssipisteen 3 kohdalla olevalle savelle ei saatu CMP-luotauksella nopeutta, joten sen alapinnan syvyyttä ei voitu tulkita. Referenssipisteen 1 kohdalla saatiin kerrokselle 3 nopeus, jonka perusteella sen päättymissyvyudeksi saatiin 4,5 metriä. Luotauslinjan 2 kerrosrajat on esitetty taulukossa 13.

Luotauslinjojen kerrosmallit on esitetty kuvassa 27 (Linja 1) ja kuvassa 28 (Linja 2).

Taulukko 13. Tattarisuon linjan 2 kerrosrajat tulkittuna referenssien, 0,1 m/ns ja CMP-luotauksella. Lisäksi arvioitu pohjaveden pinnan taso kunkin referenssipisteen kohdalla.

Linja 2

Referenssi 1 (40 m)

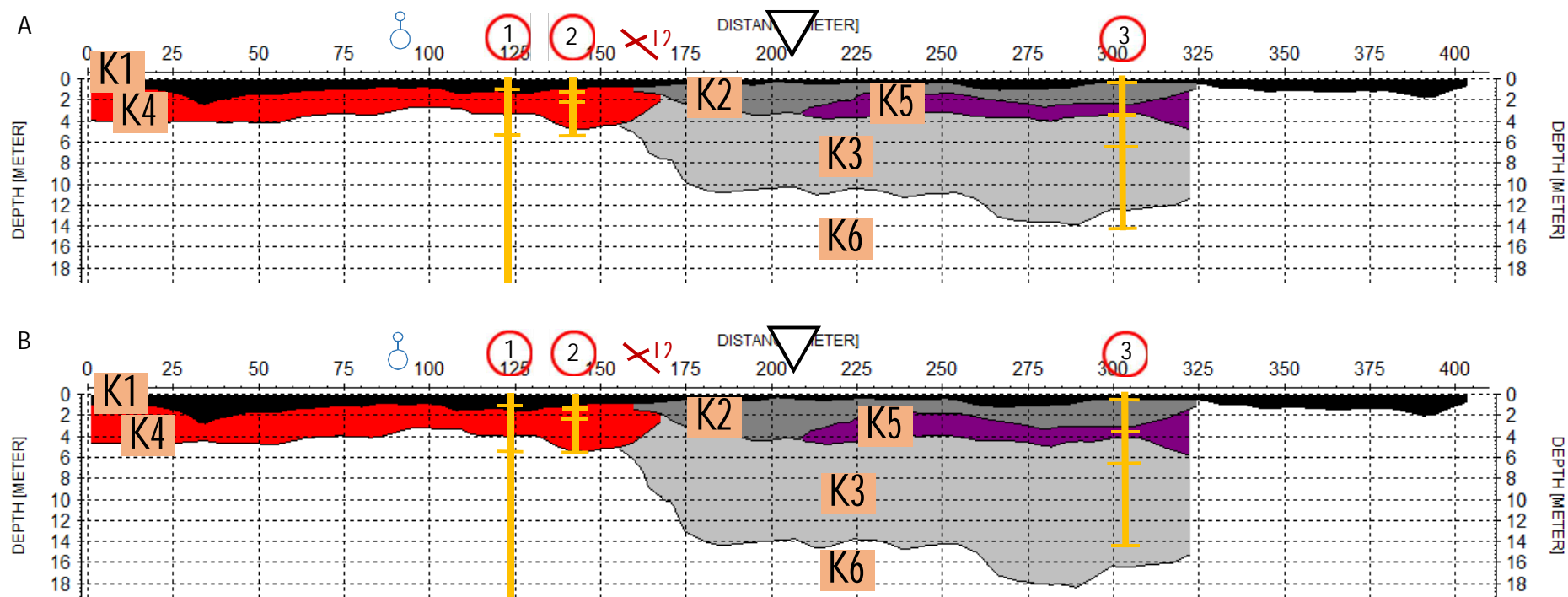
Kerrosraja	Kerrosrajan syvyys (m)			
	Referenssi	0,1 m/ns	CMP	Pohjavesi
Tä / Tä	1,7	0,9	1,0	2,9
Tä / Hk	3,8	3,1	3,2	
Hk / Sa	6,4	5,5	4,5	
Sa / SiHk	9,6			
SiHk / SiHk	14,4			

Referenssi 2 (100 m)

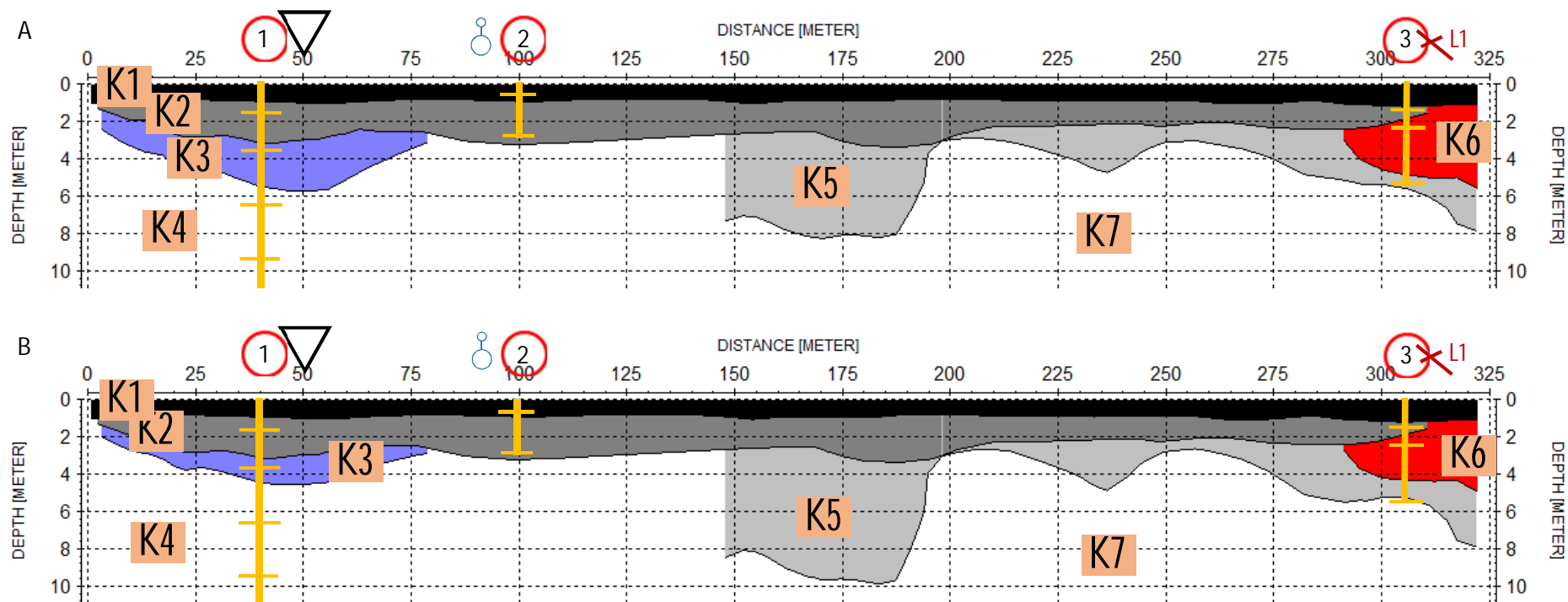
Kerrosraja	Kerrosrajan syvyys (m)			
	Referenssi	0,1 m/ns	CMP	Pohjavesi
Tä / Hk	0,4	0,9	1,0	4,2
Hk / Hk	2,9	3,2	3,3	

Referenssi 3 (306 m)

Kerrosraja	Kerrosrajan syvyys (m)			
	Referenssi	0,1 m/ns	CMP	Pohjavesi
Tä / Sa	1,4	1,2	1,3	1,3
Sa / Hk	2,2	4,8		
Hk / Ka	5,7	5,6		



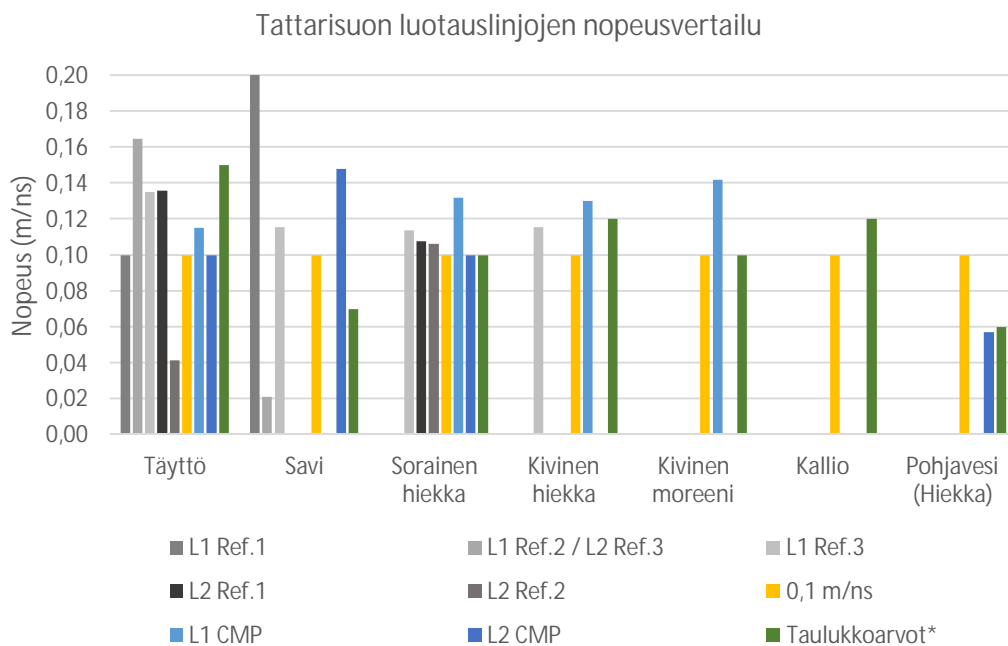
Kuva 27. (A) Kerrosmalli 0,1 m/ns:n keskinopeudella määritettynä. Kerrosmallissa (B) on käytetty CMP-luotauksella saatuja nopeuksia. Kerros 1 (K1) on täyttömaata (Tä). Kerros 2 (K2) on soraista hiekkaa (SrHk). Kerros 3 (K3) on soraista hiekkaa. Kerros 4 (K4) on savilinssi (Sa). Kerros 5 (K5) on linssimäinen kivinen hiekka (KiHk). Kerros 6 (K6) on mahdollisesti kalliota (ka). Referenssien sijainnit on merkitty punaisiin ympyröihin, pohjavesiputki sinisellä symbolilla, leikkaava luotauslinja ristillä ja CMP-luotauskohta kolmiolla. Kerrosmalleihin on lisätty kuvan 22C referenssiaineistojen syvyytiedot keltaisilla palkeilla.



Kuva 28. (A) Kerrosmalli 0,1 m/ns:n keskinopeudella määritettynä. Kerrosmallissa (B) on käytetty CMP-luotauksella saatuja nopeuksia. Kerros 1 (K1) on täyttömaata (Tä). Kerros 2 (K2) on täyttömaata tai hiekkaa (Tä / Hk). Kerros 3 (K3) on hiekkaa. Kerros 4 (K4) on savea (Sa). Kerros 5 (K5) on hiekkaa. Kerros 6 (K6) on savilinssi (Sa). Kerros 7 (K7) on mahdollisesti kalliota (Ka). Referenssien sijainnit on merkitty punaisiin ympyröihin, pohjavesiputki sinisellä symbolilla, leikkaava luotauslinja ristillä ja CMP-luotauskohta kolmiolla. Kerrosmalleihin on lisätty kuvan 24C referenssiaineistojen syvyyssiedot keltaisilla palkeilla.

6.2.4. Tulosten tulkinta ja vertaaminen referenssiaineistoihin

Kuvaan 29 on havainnollistettu Tattarisuolla luodattujen kahden luotauslinjan kerrosnopeudet kullekin maalajille. Referenssikerrosten nopeudet on saatu laskennallisesti vertaamalla referenssipaksuuksia tulkittuihin linjoihin. Lisäksi kaaviossa esitetään yleinen keskinopeusarvio (0,1 m/ns), CMP-luotauksella saadut nopeudet sekä taulukon 2 vertailuarvoja kullekin maalajille



Kuva 29. Tattarisuon molempien luotauslinjojen nopeudet kerroksittain. Kaaviossa on esitetty jokaiselle alueen maalajille saadut kerrosnopeudet referenssisyvyyksien, 0,1 m/ns ja CMP-luotauksen avulla. Lisäksi taulukkoon on laitettu taulukkoarvoja kyseisille maalajeille. *Taulukkoarvoina on käytetty täytölle hiekan nopeutta 0,15 m/ns (Reynolds 1997), savi 0,070 m/ns (van Heteren 1998), sorainen hiekka 0,100 m/ns (van Heteren 1998), kivinen hiekka 0,130 m/ns (van Heteren 1998), karkea moreeni 0,08 m/ns (Hänninen 1991), Graniittinen kallio 0,12 m/ns (Reynolds 1997) ja vedenkylästä hiekka 0,060 m/ns (van Heteren 1998).

Täyttökerroksen arvot ovat hyvin linjassa keskenään. Luotauslinja 2 toisen referenssipisteen täytön kerrosnopeus on selkeä poikkeus kun nopeus jää ainoastaan 0,041 m/ns. Tämä johtuu luultavasti joko tulkinnallisesta virheestä tai vanhan (1968) referenssiaineiston tuottamasta virheestä. Keskimäärin referenssien kerrosnopeudet ovat hyvin lähellä taulukkoarvoa 0,15 m/ns. Puolestaan 0,1 m/ns:n keskiarvo ja CMP-luotauksella saadut arvo jäävät näistä arvoista jonkin verran. Mahdollista on että CMP-luotauksen arvot selittyisivät sillä että CMP-luotauksia ei voitu

suorittaa samaan aikaan kuin profiililuotaukset on tehty. Tästä voi aiheutua suuriakin eroja (Conyers 2013).

Savikerroksen tulokset ovat hyvin hajanaisia, mistä voisi päätellä tulkinnan epäonnistuneen. Savikerrokset ovat hankalia maatulauksen kannalta radioaallon nopean vaimenemisen vuoksi (esim. Hänninen 1991). Tattarisuon tapauksessa saven kerrospaksuudet olivat 2-5 metrin välillä mikä on maatulauksen kannalta hyvin hankala tilanne, kun jo metrin paksuinen savikerros voi estää tutkasignaalien kulun (Hänninen 1991).

Soraisessa hiekkakerroksessa puolestaan kerrosnopeudet ovat kaikki hyvin linjassa keskenään. Linjan 1 CMP-luotauksella on saatu hieman poikkeava arvo (0,132 m/ns), mutta tämäkin on hyvin lähellä niin referenssipisteiden kuin taulukkoarvojen tuloksia. Tasaiset tulokset indikoivat myös tulkinnan onnistumisesta soraisessa hiekkakerroksessa.

Kivisessä hiekassa tulokset ovat saman-tyyppisiä kuin soraisessa hiekassa. Referenssipisteistä ei tähän saatu kuin yksi vertailunopeus, mutta se asettuu hyvin lähelle taulukkoarvon ja CMP-luotauksella saatua kerrosnopeutta. Keskiarvoinen 0,1 m/ns:n kerrosnopeus ei myöskään jää tästä paljoa, mutta CMP-luotauksen nopeus on kuitenkin hieman lähempänä muita referenssejä.

Kiviselle moreenille ei montaa arvoa tutkimuksissa saatu. Arvot ovat CMP-luotauksen 0,142 m/ns sekä keskiarvonopeuden 0,1 m/ns ja taulukkoarvon 0,1 m/ns. CMP-luotauksen korkea arvo voi johtua siitä, että moreeni tutkimusalueella on melko syvällä noin 14 metrissä, jolloin CMP-luotauksen signaalit joutuvat käymään läpi hyvin monta taittumis- ja heijastumisvaihetta. Tällöin riski väärien tulosten saamiseksi kasvaa (Conyers 2013). Toisaalta on myös mahdollista että moreeniksi tulkittu kerros on tulkittu väärin. Jos kerros on esimerkiksi karkeaa soraa, olisi CMP-luotauksella saatu tulos huomattavasti lähempänä.

Kallio Tattarisuolla oli kohdissa, joista ei saatu yhtään referenssiaineistoa nopeuslaskelmiin. Luotauslinjojen taitteessa olevassa referenssissä kallionpinta on mahdollisesti 5,7 metrin syvyydellä (Taulukko 13). Tätä ei kuitenkaan ole varmistettu.

Tattarisuolla pyrittiin saamaan tuloksia pohjaveden kyllästämistä kerroksista. Tässä onnistuttiin luotauslinjalla 2. Myös luotauslinjalla 1 oli profiililuotausten perusteella nähtävissä mahdollinen pohjaveden pinta, mutta ainakaan CMP-luotauksella saatujen kerrosnopeuksien perusteella vettä ei kerroksissa ollut. Luotauslinjalla 2 puolestaan saatiin hyvin selkeä tulos, joka viittasi pohjaveden kyllästämään kerrokseen (0,057 m/ns). Kerros on hiekkaa ja vastaa hyvin taulukkoarvon 0,060 m/ns:n kerrosnopeutta. Pohjavedenkyllästämään kerrokseen 0,1 m/ns:n keskiarvo toimii huonosti ja antaa liian isoja kerrospaksuuksia pohjavesikerrokselle. Keskiarvoista 0,1 m/ns keskinopeutta ei tulisi käyttää pohjavesiesiintymien tutkimuksissa.

6.2.5. Pohdintaa kohteen luotauksista

Tattarisuolla päämääränä oli saada selkeitä kerrosnopeuksia erityisesti pohjaveden kyllästämille kerroksille. Tämä onnistui hyvin luotauslinjalla 2. Luotauslinjalla 1 oli profiililinjoiden perusteella potentiaalinen kerrosraja, mutta CMP-luotauksen kerrosnopeudet eivät viitanneet pohjaveteen. Ainakin tässä tapauksessa CMP-luotauksen käyttö poisti mahdollisuuden virheelliselle pohjavedenpinnan tulkinnalle. Jos olisi oletettu linjalla 1 olevan pohjavettä, olisi luotauslinjan kerrosnopeuksien tulkinta voitu tehdä toisin jolloin todelliset kerrospaksuudet olisivat olleet virheellisiä. CMP-luotaukset antoivat muutenkin hyvin oikeanlaisia tuloksia, joskin ehkä hieman yläkanttiin verrattuna muihin aineistoihin.

Tattarisuolla kävi myös hyvin ilmi suojaamattoman ja suojatun antennin ero. Malån suojaamattomat antennit kärsivät voimakkaasti häiriöistä maanpäällisten lyhtypylväiden kohdalla. 50 MHz:n antennin kohdalla häiriöt olivat niin suuria, ettei profiililinjalla saatu mitään lisäarvoa tutkimukselle. 100 MHz:n antennilla häiriöt saatiin poistettua prosessoinnilla melko hyvin. Puolestaan GSSI:n suojatulla 270 MHz:n antennilla häiriöt lyhtypylväiden kohdalla olivat hyvin pienet eikä tämä vaikeuttanut tulkintaa ollenkaan.

6.3. Hollolan deltamuodostuma

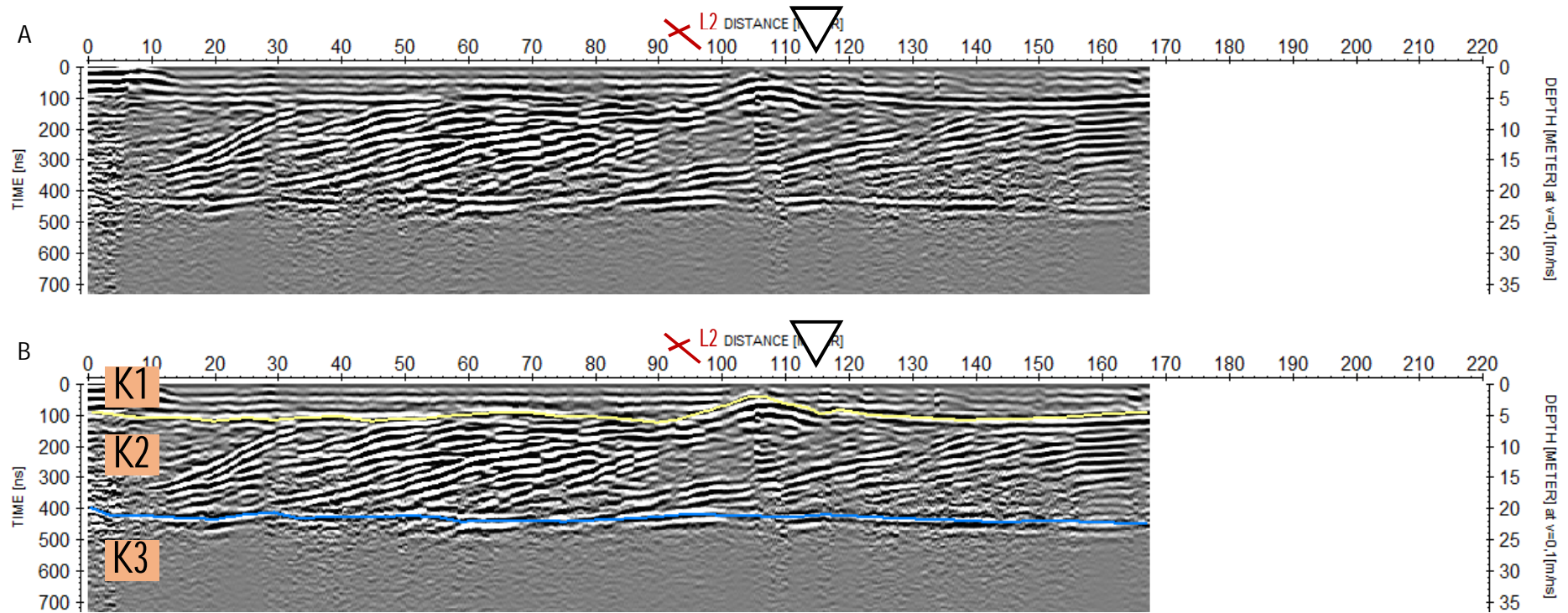
6.3.1. Profiililinjat

Kaikki profiililuotauslinjat muistuttavat kerrosrakenteeltaan hyvin pitkälti toisiaan. Kerrosrakenne muodostuu päällimmäisistä deltan muodostuman topset- ja foreset-kerroksesta ja pohjavedenpinnan alapuolisesta hiekkaisesta kerroksesta. Kallionpinta alueella on maatutkalinjojen ulottumattomissa, paikoin jopa yli 60 metrin syvyydessä (Ahonen et al. 2011).

Luotauslinjalla 1 ensimmäinen rajapinta kulkee noin 100 ns:n syvyydellä. Jälkimmäinen kerrosraja puolestaan kulkee noin 430 ns:n syvyydellä. Luotauslinjalla 2 ensimmäinen kerrosraja tulee vastaan 100 ns:n kohdalla ja alempi 450 ns:n kohdalla. Linjalla 3 ensimmäinen kerros on hieman edeltäviä matalammalla kulkien noin 50 ns:n kohdalla. Alempi rajapinta kulkee 420 ns:n kohdalla. Linjalla 3 päällimmäinen kerros on todennäköisesti ohentunut alueen soranotosta johtuen. 30 MHz:n luotauslinjat on esitelty kuvissa 30 (linja 1), 31 (linja 2) ja 32 (linja 3).

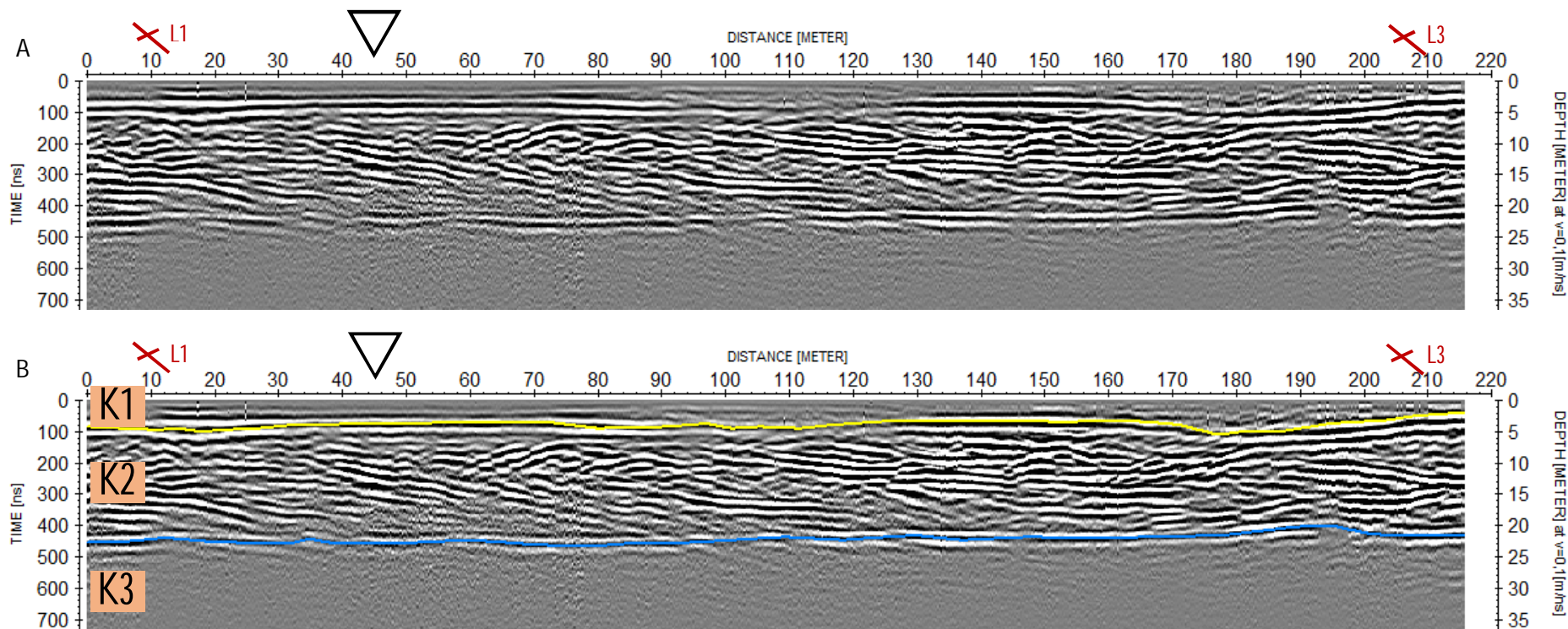
Referenssiaineistojen ja silmämääräisen tarkastelun (kuva 33) perusteella topset-kerros on alueella kivistä soraa (KiSr), joka vaihtuu hiekkaiseksi soraksi (HkSr) foreset-kerrokseen. Referenssien perusteella pohjavedenpinnan alapuolinen aines olisi hiekkaa (Hk). Kivisen soran ja hiekkaisen soran välistä kerrosta on kuvattu keltaisella viivalla luotauslinjojen tulkinnoissa. Hiekkaisen soran ja pohjaveden tason kontakti on kuvattu sinisellä viivalla.

Profiililinja 1



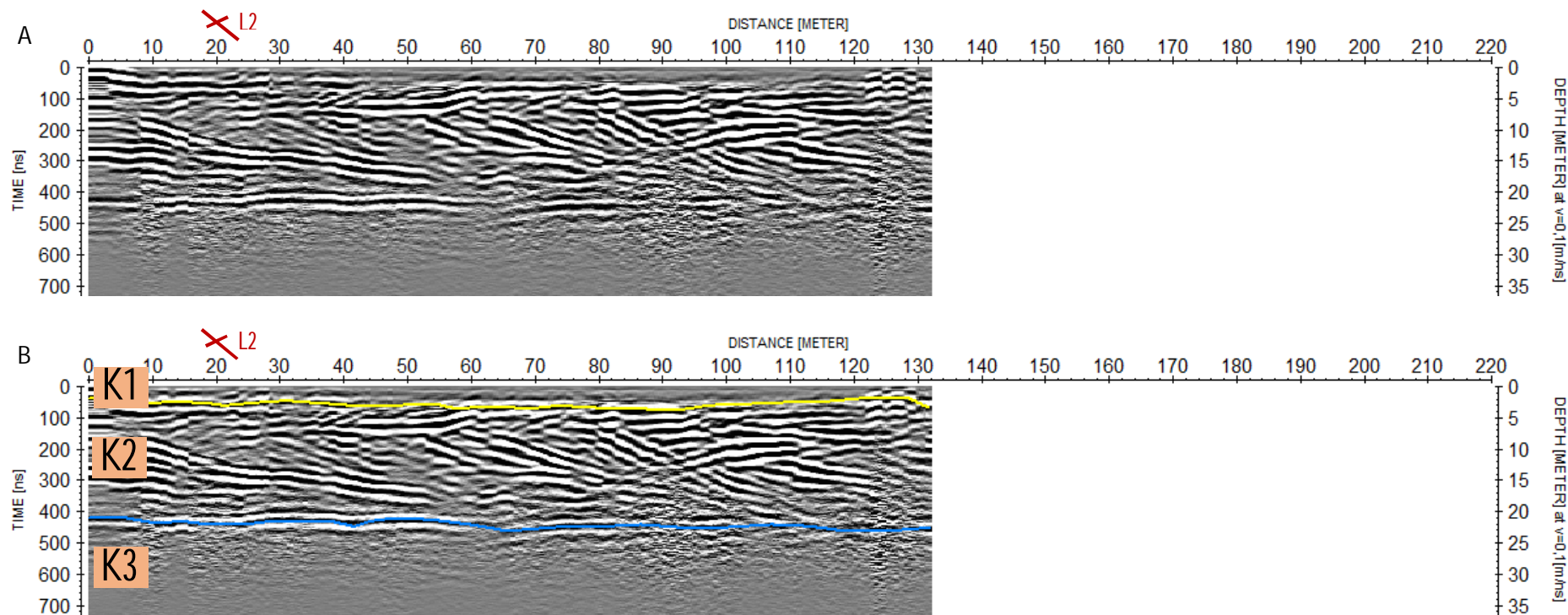
Kuva 30. (A) Hollolan prosessoitu luotauslinja 1. (B) Luotauslinjalta tulkitut jatkuvat kerrosrajapinnat korostettuna eri värein. (C) Tiedot luotauslinjan läheisyydessä olevien kairanreikien pohjalta tulkituista kerrospaksuuksista. Kerros 1 (K1) on kivistä soraa (KiSr). Kerros 2 (K2) on hiekkaista soraa (HkSr). Kerros 3 (K3) on pohjavedenkyllästämää hiekkaa (Hk). * Kerrospaksuudet ovat summattaisia eikä välttämättä ole täysin päteviä juuri kyseisen linjan kohdalla.

Profiililinja 2



Kuva 31. (A) Hollolan prosessoitu luotauslinja 1. (B) Luotauslinjalta tulkitut jatkuvat kerrosrajapinnat korostettuna eri värein. (C) Tiedot luotauslinjan läheisyydessä olevien kairanreikien pohjalta tulkituista kerrospaksuuksista. Kerros 1 (K1) on kivistä soraa (KiSr). Kerros 2 (K2) on hiekaista soraa (HkSr). Kerros 3 (K3) on pohjavedenkyllästämää hiekkaa (Hk). * Kerrospaksuudet ovat summittaisia eikä välttämättä ole täysin päteviä juuri kyseisen linjan kohdalla.

Profiililinja 3



Kuva 32. (A) Hollolan prosessoitu luotauslinja 1. (B) Luotauslinjalta tulkitut jatkuvat kerrosrajapinnat korostettuna eri värein. (C) Tiedot luotauslinjan läheisyydessä olevien kairanreikien pohjalta tulkituista kerrospaksuuksista. Kerros 1 (K1) on kivistä soraa (KiSr). Kerros 2 (K2) on hiekkaista soraa (HkSr). Kerros 3 (K3) on pohjavedenkyllästämää hiekkaa (Hk). * Kerrospaksuudet ovat summittaisia eikä välttämättä ole täysin päteviä juuri kyseisen linjan kohdalla.

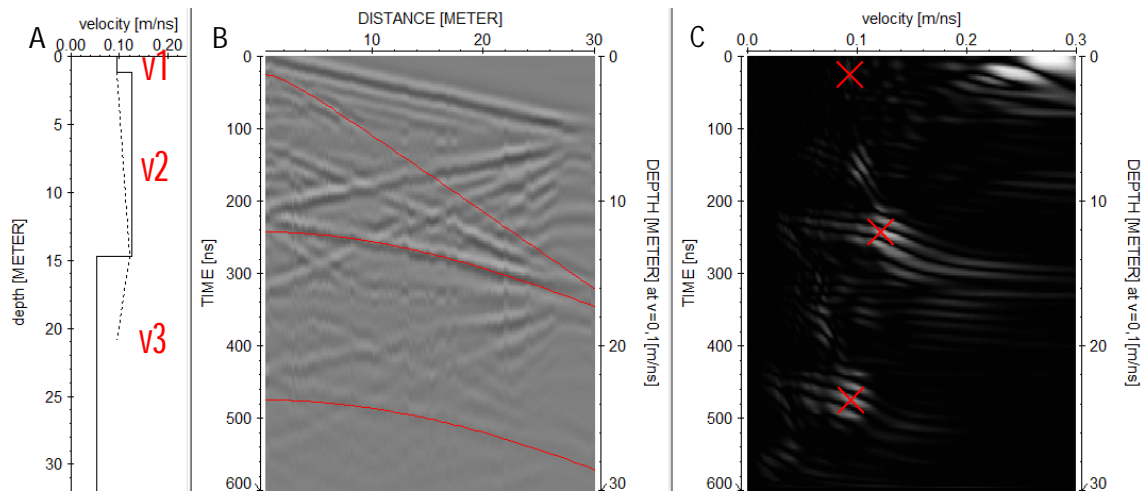


Kuva 33. Hollolan soranottoalueen näkyvää kerrosrakennetta. Kuvasta voidaan arvioida topset-kerroksen paksuutta eri luotauslinjoilla. Alkuun kerrospaksuus on 5-6 metriä luotauslinjalla 1, luotauslinjalla 2 kerrospaksuus on 4-5 metriä ja luotauslinjalla 3 kerrospaksuus jää noin 2-3 metriin.

6.3.2. CMP-luotaus

CMP-luotaus Hollolassa osoittautui monellakin tavalla haastavaksi. Kohteen luotaus tapahtui talvella ja lunta oli huomattavan paljon. Lisäksi luotauslinjan tulkinta oli haasteellista virhesignaalien vuoksi.

Prosessoidulta CMP-luotauslinjalta voitiin semblance-analyysin avulla (Kuva 34A) tulkita kolme eri nopeusvyöhykettä: V1 0,093; V2 0,126; V3 0,045. V1 nopeus pystyttiin tulkitsemaan sekä visuaalisesti CMP-aineistosta (Kuva 34B) että semblance-analyysin kuvaajasta. Nopeuksien v2 ja v3 nopeudet pystyttiin aineiston kohinan vuoksi tulkitsemaan ainoastaan semblance-analyysin tuottaman kuvaajan avulla (kuva 34C). Hollolan CMP-aineiston tulkinta on kuvassa 34.



Kuva 34. (A) Semblance-analyysillä tulkitut kerrosnopeudet: v_1 0,093; v_2 0,126; v_3 0,045. (B) Prosessoitu CMP-luotauslinja, jossa tulkitut hyperbelit. (C) Tulkitut keskimääräiset kerrosnopeudet yksittäisille syvyyksille.

6.3.3. Kerrosmallit

Kerrosmallissa, jossa on käytetty 0,1 m/ns:n keskinopeutta, saatiin kivisen soran ja hiekkaisen soran rajapinnan syvyydeksi 2–6 metriä. Linjoilla 1 ja 2 kerrospaksuus on keskimäärin paksumpi kuin linjalla 3. Hiekkaisen soran ja hiekkakerroksen välinen rajapinta puolestaan asettuu kaikilla linjoilla kutakuinkin 20–23 metrin väliin.

CMP-aineiston perusteella ensimmäinen rajapinta kulkee likimain samoin kuin 0,1 m/ns:n keskiarvollakin. Linjoilla 1 ja 2 kerrospaksuus on hieman paksumpi kuin linjalla 3. Jälkimmäisen rajapinnan arvot puolestaan poikkeavat suuresti CMP-luotauksella saadun nopeamman kerrosnopeuden vuoksi. Soraisen hiekan ja hiekan välinen rajapinta sijaitsee 24–28 metrin syvyydellä, mikä vastaa hyvin referenssiaineistoa. Kerrosrajojen tulkinnat kaikkien linjojen osalta on esitetty taulukossa 14 ja luotauslinjojen kerrosmallit kuvassa 35 (Linja 1), 36 (Linja 2) ja 37 (Linja 3).

Taulukko 14. Hollolan kerrosrajapintojen syvyydet referenssiaineiston, 0,1 m/ns:n keskinopeuden sekä CMP-luotausaineiston perusteella.

Luotauslinja 1

Kerrosraja	Kerrosrajan syvyys (m)		
	Referenssi	0,1 m/ns	CMP
KiSr / HkSr	2 - 6	2 - 5	2 - 5
HkSr / Hk	24 - 28	20 - 22	24 - 27
Hk / Ka	48 - 60	-	-

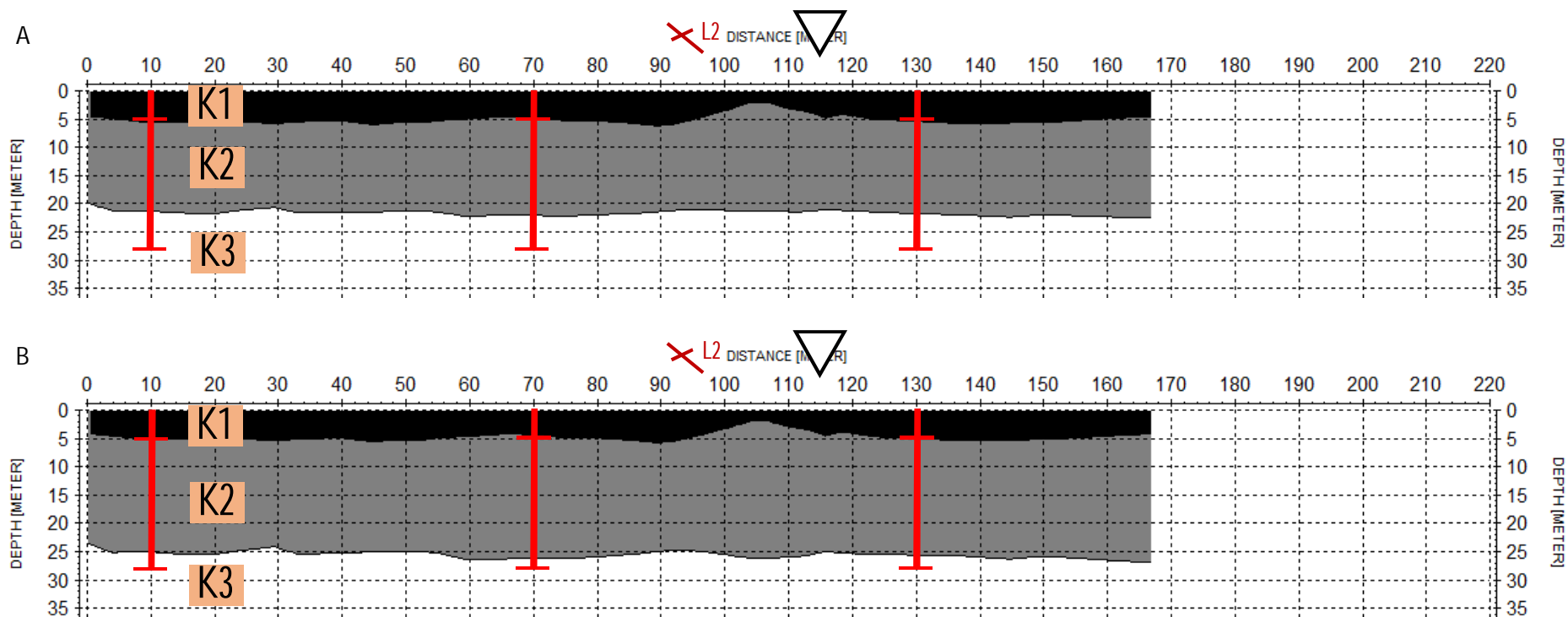
Luotauslinja 2

Kerrosraja	Kerrosrajan syvyys (m)		
	Referenssi	0,1 m/ns	CMP
KiSr / HkSr	2 - 5	2 - 6	2 - 5
HkSr / Hk	24 - 28	20 - 23	24 - 28
Hk / Ka	48 - 60	-	-

Luotauslinja 3

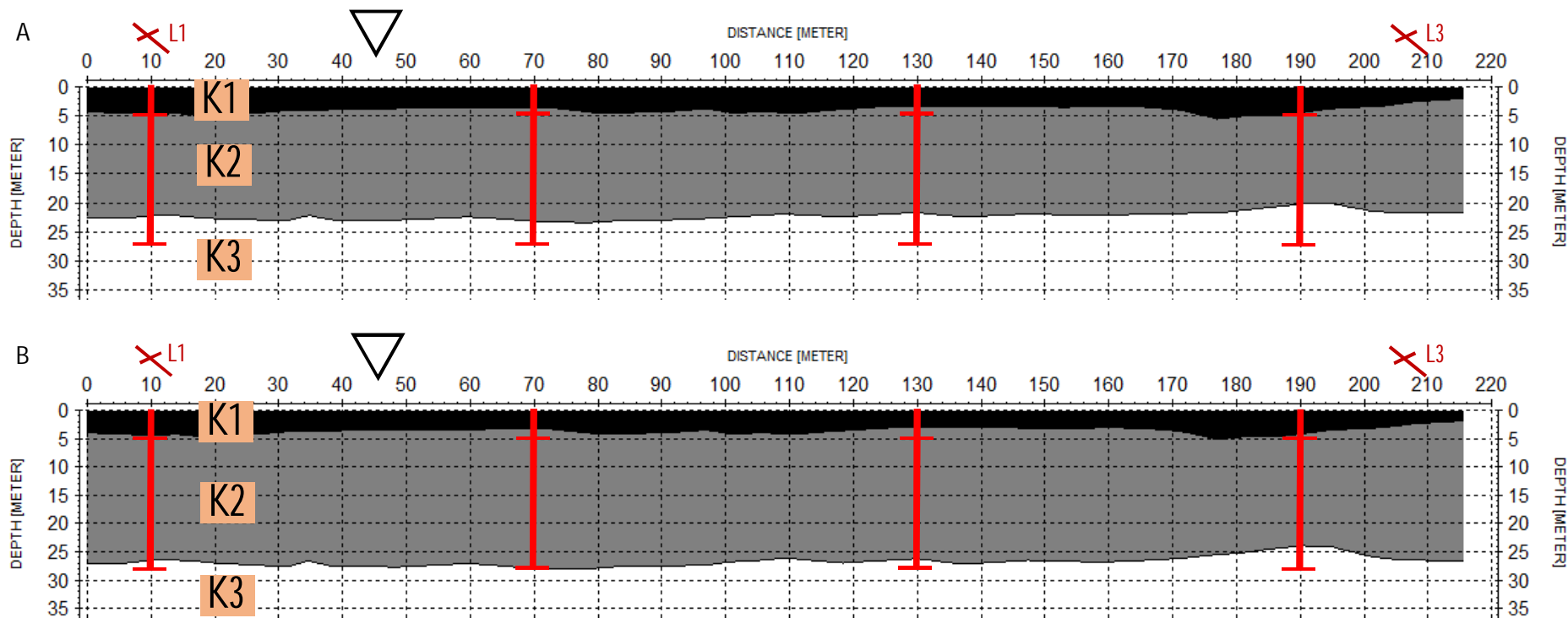
Kerrosraja	Kerrosrajan syvyys (m)		
	Referenssi	0,1 m/ns	CMP
KiSr / HkSr	2 - 4	2 - 4	2 - 4
HkSr / Hk	24 - 28	21 - 23	25 - 28
Hk / Ka	48 - 60	-	-

Kerrosmalli 1



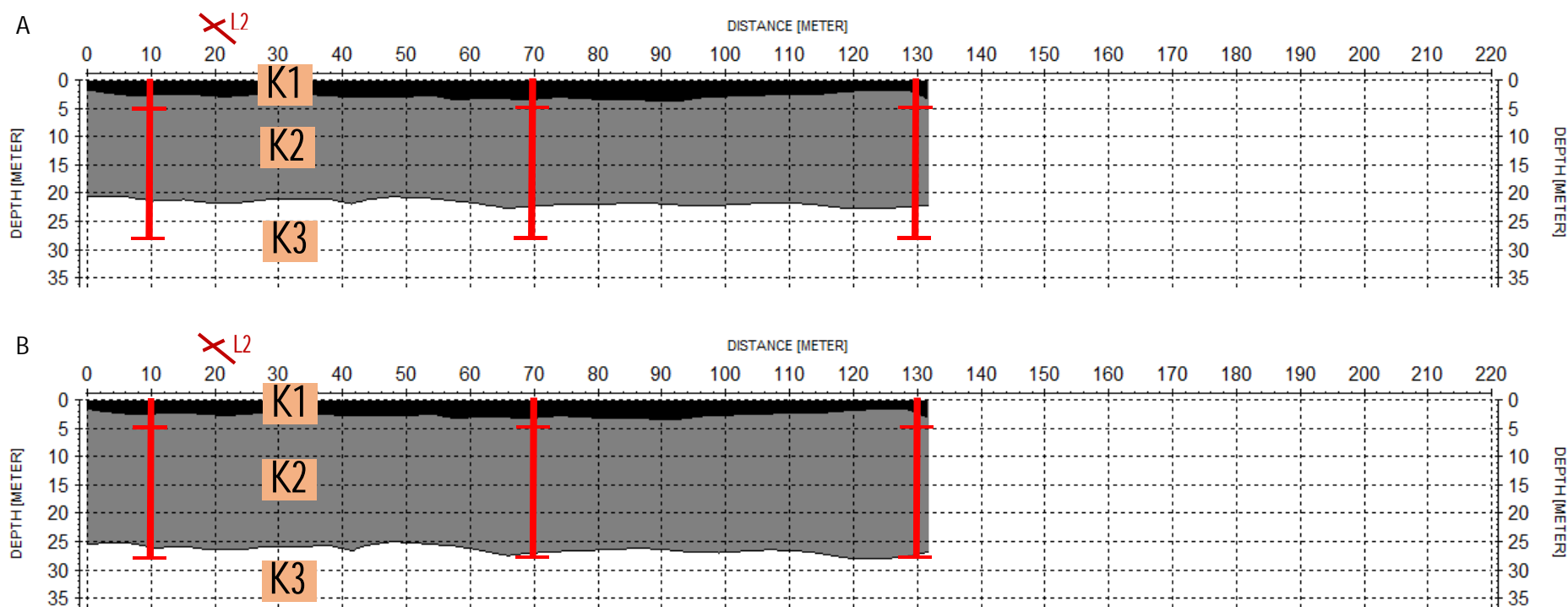
Kuva 35. (A) Kerrosmalli 0,1 m/ns:n keskinopeudella määritettynä. Kerrosmallissa (B) on käytetty CMP-luotauksella saatuja nopeuksia. Kerrosmalleihin on lisätty kuvan 30C referenssiaineiston syvyystiedot punaisiin palkeihin muutamaan luotauslinjan kohtaan. Kerrosmalleissa mustalla kerroksella on esitetty kivisen soran kerrospaksuus (K1). Tummempi harmaa kuvastaa hiekaista soraa (K2) ja vaaleampi harmaa pohjaveden kyllästämää hiekkaa (K3).

Kerrosmalli 2



Kuva 36. (A) Kerrosmalli 0,1 m/ns:n keskinopeudella määritettynä. Kerrosmallissa (B) on käytetty CMP-luotauksella saatuja nopeuksia. Kerrosmalleihin on lisätty kuvan 30C referenssiaineiston syvyystiedot punaisiin palkeihin muuttamaan luotauslinjan kohtaan. Kerrosmalleissa mustalla kerroksella on esitetty kivisen soran kerrospaksuus (K1). Tummempi harmaa kuvastaa hiekaista soraa (K2) ja vaaleampi harmaa pohjaveden kyllästämää hiekkaa (K3).

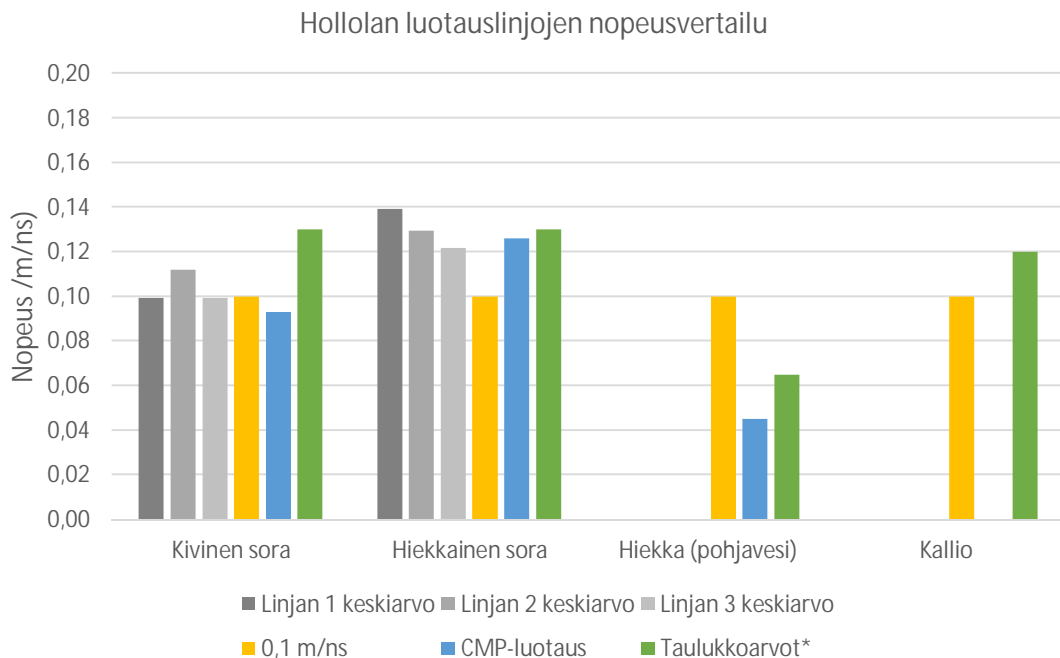
Kerrosmalli 3



Kuva 37. (A) Kerrosmalli 0,1 m/ns:n keskinopeudella määritettynä. Kerrosmallissa (B) on käytetty CMP-luotauksella saatuja nopeuksia. Kerrosmalleihin on lisätty kuvan 30C referenssiaineiston syvyystiedot punaisiin palkeihin muutamaa luotauslinjan kohtaan. Kerrosmalleissa mustalla kerroksella on esitetty kivisen soran kerrospaksuus (K1). Tummempi harmaa kuvastaa hiekaista soraa (K2) ja vaaleampi harmaa pohjaveden kyllästämää hiekkaa (K3).

6.3.4. Tulosten tulkinta ja vertaaminen referenssiaineistoihin

Kuvaan 38 on havainnollistettu Hollolan luotauslinjojen kerrosnopeudet kullekin maalajille. Poiketen muista tämän työn kohteista Hollolan luotauslinjojen varrelle ei voitu määrittää tarkkoja referenssikohtia. Luotauslinjojen referenssit on laskettu 3-4 pisteen keskiarvosta kullekin luotauslinjalle ja käytetty keskiarvoa kuvastamaan kerroksen referenssinopeutta. Keskiarvot on laskettu kerrosmalleihin mallinnetuista kohdista linjalle 1 (Kuva 35), linjalle 2 (Kuva 36) ja linjalle 3 (Kuva 37). Lisäksi kaaviossa esitetty yleinen keskinopeusarvio (0,1 m/ns), CMP-luotauksella saadut nopeudet sekä taulukon 2 vertailuarvoja kullekin maalajille.



Kuva 38. Hollolan luotauslinjojen nopeusvertailu. Kaaviossa on esitetty jokaiselle alueen maalajille saadut kerrosnopeudet referenssisyvyyksien keskiarvoista, 0,1 m/ns ja CMP-luotauksen avulla. Lisäksi taulukkoon on laitettu taulukkoarvoja kyseisille maalajeille. *Taulukkoarvoina on käytetty soran nopeutta 0,13 m/ns, pohjavedenkyllästämän hiekan nopeutta 0,065 m/ns ja Graniittinen kallio 0,12 m/ns nopeutta (van Heteren 1998).

Kivinen sorakerros antoi referenssien perusteella hyvin tasaisia tuloksia (0,10–0,11 m/ns). Kivisen sorakerroksen referenssien keskiarvoissa on käytetty silmämääräistä arviota topset-kerroksen kerrospaksuudesta kullekin linjalle (Kuva 33). Linjalle 1 on arvioitu keskimääräiseksi kerrospaksuudeksi viisi metriä. Linjalle 2 on arvioitu kerrospaksuudeksi neljä metriä ja linjalle 3 enää kolme metriä. Topset-kerroksen kerrospaksuus vaihtelee alueella johtuen soranotosta sekä jäätikön sulamisvesiuomien kulutuksesta. Luotauslinjoilta saadut referenssit vastaavat hyvin niin

CMP-luotauksella kuin keskiarvoisella 0,1 m/ns nopeudella saatuihin nopeuksiin. Taulukkoarvon kerrosnopeus ei näyttäisi tässä vastaavan tulokseksi saatuja tuloksia.

Hiekkaisen soran kerrosnopeudet ovat hyvin lähellä toisiaan. Poikkeava arvo saadaan 0,1 m/ns keskinopeudella, mikä viittaisi siihen että CMP-luotauksella saatu kerrosnopeus toimisi tässä kerroksessa paremmin. Niin referenssilinjojen keskiarvot kuin taulukkoarvotkin osuvat hyvin yksiin CMP-luotauksen kanssa.

Hiekkaisen pohjavesikerroksen nopeudeksi CMP-luotauksella saatiin 0,045 m/ns, mikä on melko lähellä taulukkoarvoa 0,065 m/ns. Keskiarvoinen 0,1 m/ns keskiarvo puolestaan antaisi liian paksun kerrospaksuuden pohjavesikerrokselle, mikäli luotauslinjat ylettäisivät kallionpintaan asti. Kallion pinnasta ei tässä tutkimuksessa saatu kerrosnopeustietoa.

6.3.5. Pohdintaa kohteen luotauksista

Luotauskohteella tarkasteltuna CMP-luotauksella saadulta profiililinjalta ei voitu erottaa mitään selkeää heijastavaa pintaa. Linjalla oli hyvin paljon häiriötä, mikä todennäköisesti johtuu deltan foreset-kerroksen kaatuvista rakenteista, jotka häiritsevät suuresti CMP-luotusta (Everett 2013). Yllättäen CMP-luotauksen prosessoidusta linjasta saatiin semblance-analyysillä kuitenkin tulkittua hyvin oikean tuntuisia tuloksia, jotka sopivat Hollolan profiililuotauslinjoille. Tämä voi johtua siitä, että Hollolassa horisontaaliset kerrokset olivat hyvin selkeitä ja heijasteet olivat tästä syystä riittävän vahvoja häiriötekijöistä huolimatta.

Hollolassa profiililuotauksia ei saatu tehtyä samaan aikaan kuin CMP-luotauksia laiterikon vuoksi. Tämä voi olla hyvinkin merkittävä tekijä, jos olosuhteet ovat hyvin toisistaan poikkeavat (Conyers 2013). Hollolassa saadut CMP-luotauksen nopeudet verrattuna referenssiaineistoihin viittaisivat kuitenkin siihen, ettei luotauksen ajankohdalla tässä tapauksessa ollut suurta merkitystä.

6.4. Laitteistojen vertailu

Molempien laitteistojen keskusyksiköt ovat hyvin helppokäyttöisiä. GSSI:n SIR-3000-keskusyksikköön on integroituna näyttö toisin kuin Malån ProEx -keskusyksikössä, johon näyttö kiinnitetään erillisenä. Integroitu näyttö lisää GSSI:n keskusyksikön massaa ja olkahihnaa käyttäessä alkaa suurempi massa tuntumaan pidemmän päivän aikana. Integroitu näyttö kuitenkin vähentää tarvittavien johtojen määrää, mikä on selvä etu. GSSI:n näyttöä ohjaillaan lukuisilla painikkeilla, kun taas Malå hyödyntää vain yhtä pyörivää painiketta ohjelmiston käytössä. Malån keskusyksikkö hyödyntää jatkuvaa GPS-signaalia luotauksen yhteydessä toisin kuin GSSI:n laitteisto, joka tallentaa ainoastaan luotauslinjan alku- ja loppupisteen. Merkittävä ero keskusyksiköiden suhteen on, että Malån ProEx -keskusyksiköllä voidaan kerätä tietoa usealla antennilla samanaikaisesti. GSSI:n keskusyksikössä on hieman enemmän säätövaraa tutkimuksen parametrien asettelussa.

Antennien osalta eri valmistajien tuotteita on hankala verrata, koska antennien käyttötarkoitukset ovat erilaiset. Malån RTA-antennit on tarkoitettu vaativaan maastoon, jossa tarvitaan maksimaalista tarkkuutta ja syviä luotauslinjoja. RTA-antennit ovat letkumaisia, jotka kulkevat luotaajan perässä reppuun kiinnitettynä. RTA-antenneja käyttäessä on syytä olla avustaja varmistamassa, etteivät antenniletkut juutu juurakkoihin tai risuihin. Malån antennit olivat myös suojaamattomia, mikä tuo oman hankaluutensa erityisesti rakennetussa ympäristössä, jossa voidaan saada paljon häiriösignaaleja.

GSSI:n 270 MHz:n antenni puolestaan on kooltaan selkeästi pienempi, mutta vaihtelevassa maastossa sen käyttö on laatikkomaisen muodon takia hankalampaa. 270 MHz:n antennia on helppo operoida yksinkin ja se sopii suojauksensa vuoksi hyvin rakennettuun ympäristöön. GSSI:n 3200 MLF -antennia puolestaan on syytä olla operoimassa 2–4 henkilöä. Levitettävän antennin, niin lähettimen kuin vastaanottimen, käyttöön tarvitaan eri henkilöt. Lisäksi luotausta helpottaa, mikäli kolmas henkilö operoi keskusyksikköä ja valvoo muita käyttäjiä. Jos mahdollista niin yksi henkilö on hyvä olla selvittämässä pitkiä kaapeleita, jotka lähettimen ja vastaanottimen välille on kytketty. MLF-antenni on Malån antennien tapaan suojaamaton, jolloin ulkopuoliset häiriösignaalit voivat olla haitaksi.

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä hyödynnettiin kahden laitevalmistajan maatumkalaitteistoja: Malå ja GSSI. Kahden laitteiston etuna oli, että voitiin kartuttaa kokemusta useammasta laitteesta ja voitiin hyödyntää erityyppisiä antennejä profiililuotausten tekemiseen. Laitteistot poikkesivat hieman toisistaan, mutta kumpikaan laitteisto ei ollut merkittävästi toista parempi. Suurin ero lienee GSSI:n keskusyksikköön integroitu näyttö, jolloin johtojen määrä luotauksessa vähenee. Antenneja puolestaan on haastava verrata keskenään, koska antennit on suunniteltu tiettyä käyttöä varten. Malån RTA-antennit on suunniteltu nimenomaan geologisten kohteiden syviin ja tarkkoihin kartoituksiin. GSSI:n 270 MHz:n antenni taas soveltuu hyvin kaupunkiympäristössä tapahtuvaan tutkimukseen. Antennien yhteiskäytöstä oli paljon hyötyä ja saatiin tulkittua niin maanpinnan läheiset kerrokset kuin hieman syvemmälläkin olevat kerrokset.

Tämän työn tärkein anti oli saada kokemusta CMP-luotauksen käytöstä erilaisissa kohteissa. Saadun käyttökokemuksen perusteella CMP-luotauksella voidaan saada merkittävää tulkinnallista hyötyä, jos halutaan saada maaperän kerrosrakenteesta tietoa eikä esimerkiksi tarkkoja referenssejä ole saatavilla. Jokaisella tutkimuskohteella saatiin positiivisia ja hyvin referenssiaineistojen kanssa korreloivia tuloksia, joskin mukaan mahtuu myös tuloksia, jotka poikkeavat tästä. Patolassa CMP-luotauksella saatiin hyvin tarkasti määritettyä täyttökerroksen ja hiekkaisen moreenikerroksen kerrosnopeus. Tattarisuolla hiekkaisen kerrosten kerrosnopeudet vastasivat hyvin referenssiaineistoja ja taulukkoarvoja. Lisäksi Tattarisuolla voitiin varmentaa pohjaveden esiintyminen luotauslinjalla 2 ja pohjaveden puuttuminen luotauslinjalta 1. Hollolassa puolestaan CMP-luotaus ensivaikutelmasta huolimatta tuotti erinomaisia tuloksia ja sen avulla päästiin hyvin lähelle referenssien indikoimia kerrosnopeuksia koko luotauslinjojen kerrospaksuudelta.

Suurimpana haasteena CMP-luotauksessa oli esiintyneet häiriösignaalit, joita ilmeni jokaisella tutkimuskohteella. Patolassa ja Tattarisuolla häiriöt eivät olleet merkittäviä ja ne voitiin prosessoinnilla vaimentaa. Hollolassa puolestaan häiriöt olivat merkittäviä johtuen kaatuvista maaperän kerrosrakenteista. CMP-luotaus oli myös verrattain aikaa vievää. Laitteiston kasaaminen, luotaus ja aineiston käsittely vaatii runsaasti aikaa. Tässä työssä CMP-luotauslinjan pituus ja askelväli pidettiin vakiona kohteesta toiseen, mutta suositeltavaa on pohtia kohteittain askelväli sekä luotauslinjan pituus. Tällä voidaan säästää merkittävästi aikaa. CMP-luotauksessa käytettävän antennilaitteiston vertikaalinen erotuskyky on myös hyvä tiedostaa. Patolassa 80 MHz:n antennin luotausresoluutio ei riittänyt täyttökerroksen ja kivisen hiekkamoreenikerroksen

erottamiseen toisistaan. Jos käytössä olisi ollut korkeataajuisempi antenni olisi kerrokset voitu eritellä toisistaan.

CMP-luotaukseen liittyy paljon potentiaalisia virhelähteitä. Merkittävin yksittäinen virhelähde on löytää CMP-luotaukseen soveltuva luotauskohta. Luotauskohta voidaan määrittää etukäteen, mutta tämän tutkimuksen tuoman kokemuksen perusteella CMP-luotauskohta on hyvä päättää profiililuotauslinjojen perusteella, jolloin kohta voidaan valikoida mahdollisimman hyvään ja selkeään paikkaan. Luotauskohdassa on oltava tasainen maasto ja luodattavien kerrosten on oltava mahdollisimman horisontaalisia. Kaatuvat kerrokset, kuten Hollolassa, aiheuttavat merkittävää häiriötä ja vaikeuttavat aineiston käsittelyä ja tulkintaa. CMP-luotaus, kuten muutekin maatutkaluotaukset, ovat aineiston käsittelijän tulkinnan varassa. Käsittelijän ammattitaito ja kokemus edesauttavat oikeiden kerrosnopeuksien tulkinnassa semblance-analyysin ja signaalinprosessointiohjelman avulla.

Tutkaluotauksen tulkitseminen on aina subjektiivinen tulkitsijan näkemys ja ainoa varma syvyyskalibrointimenetelmä on tunnetun rajapinnan selvittäminen joko kairaamalla tai muilla havainnoilla. Aineiston käsittelijän ammattitaidon karttuessa voidaan muilla nopeusanalyysimenetelmillä päästä kohtalaisella varmuudella oikeisiin tuloksiin kunkin nopeusanalyysimenetelmän heikkoudet tiedostaen. CMP-luotaus on yksi varimmista nopeusanalyysimenetelmistä määrittää kerrosnopeudet. CMP-luotauksella pidetään kiinni myös maatutkan valtista, jolloin saadaan tutkimusaineistoa rikkomatta maan pintaa. CMP-luotaus on maailmalla yleisessä käytössä, mutta Suomessa käytöstä ei ole paljoa kirjallisuudessa. Syynä tähän voi olla ennakkoluulot CMP-menetelmää kohtaan, Suomessa tyypilliset sotkuiset ja hankalasti tulkittavat moreenikerrokset tai vain sopivien laitteistojen puute.

8. KIITOKSET

Tämän työn loppuunsaattamisen taustalla ovat ennen kaikkea mahtavat graduohjaajani: Emilia Koivisto ja Seija Kultti. Ilman heidän vinkkejään ja työpanosta olisi lopputulos ollut toinen. Iso kiitos kuuluu myös muille tutkimuksissa avustaneille.

Tämän työn onnistumisen kannalta referenssiaineistojen saanti oli oleellisen tärkeää. Suuri kiitos kuuluu Hollolan Sora Oy:lle ja Rakennusbetoni ja Elementti Oy:lle Hollolan sorakuopan lainaamisesta tutkimukselle ja referenssiaineistojen antamiselle. Patolan ja Tattarisuon referenssiaineistoista on kiittäminen Helsingin Kaupunkia.

Lisäksi haluaisin kiittää Helsingin Kaupungin, Staran, Katu- ja maalaboratoriota siitä että sain kaupungin tutkalaitteet käyttöön ja hyödyntää työaikaani ja työtiloja gradun merkeissä. Kiitos myös työ- ja opiskelutovereille sekä ystäville tuesta, ja kiitos ennen kaikkea omalle perheelle tsemppaamisesta ja patistamisesta gradun valmistumisen suhteen.

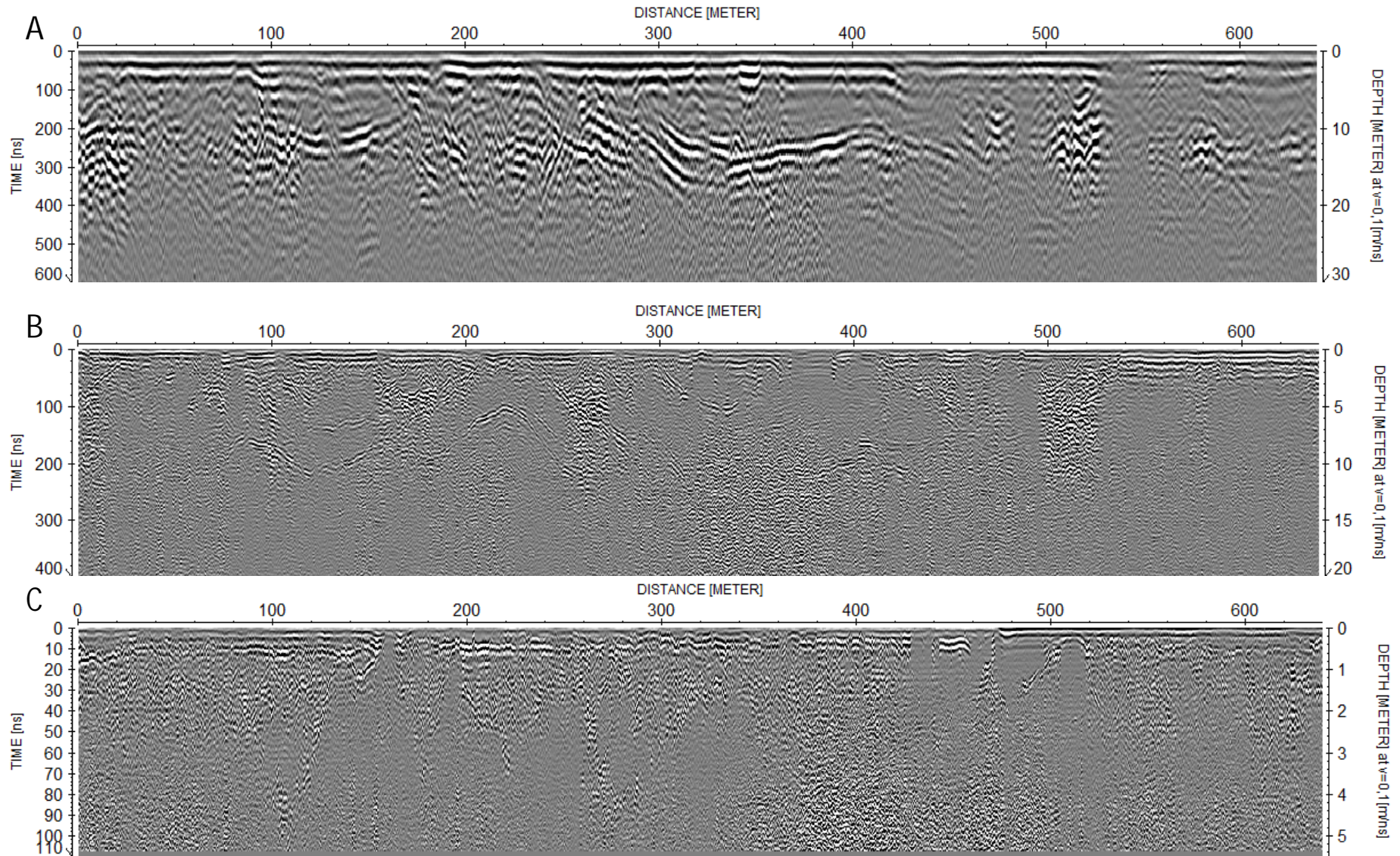
9. VIITELUETTELO

- Ahonen, J., Rauhaniemi, T. ja Valjus, T. 2011. Pohjavesialueen geologisen rakenteen selvitys Kukonkoivun-Hatsinan alueella. Geologian tutkimuskeskus. Arkistoraportti 6/2012. 201 s.
- Annan, A. P. 2002. GPR-History, Trends, and Future Developments. *Subsurface Sensing Technologies and Applications* 3, 253-270.
- Annan, A. P. 2005. GPR methods for hydrogeological studies. Teoksessa: Rubin Y. ja Hubbard, S.S. (Toim.): *Hydrogeophysics*. Water Science and Technology Library 50, 185-213. Springer, the Netherlands. 185-213.
- Baker, G. S., Jordan, T. E. ja Talley, J. 2007. An introduction to ground penetrating radar (GPR). Geological Society of America. Special Paper 432. 18 s.
- Conyers, L. B. 2013. *Ground-Penetrating Radar for Archaeology*, AltaMira Press, 3rd edition. AltaMira Press. 241 s.
- Everett, M. E. 2013. *Near-surface applied geophysics*. Cambridge University Press 2013. 403 s.
- Gamil, A., Driouach, A. ja Faize, A. 2015. Performance of GPR Influenced by Electrical Conductivity and Dielectric Constant. *Procedia Technology* 22, 570-575.
- GSSI. Geophysical Survey Systems Inc. Sivulla vierailtu 2.12.2019. <https://www.geophysical.com/>.
- GSSI antenna manual. Käyttöopas. www.geophysical.com/wp-content/uploads/2017/10/GSSI-Antenna-Manual.pdf.
- GTK Hakku. Karttatietokanta. Sivulla vierailtu 30.11.2019. <https://hakku.gtk.fi/>
- Hankiola, E., Kolu, S. ja Tarkkala, J. Kallioresurssialueiden inventointi, geologiset piirteet, maanpäällinen käyttö ja suojeluarvot. Helsingin kaupunki. Yleissuunnitteluosaston selvityksiä, Teknistaloudellinen toimisto 1/2008. 110 s.
- Helsingin kaupungin karttapalvelu. Paikkatietovipunen, Helsingin kaupunki. Vierailtu 2.12.2019. <http://paikkatietovipunen:10058/>
- Heteren, S. van., FitzGerald, D. M., McKinlay, P. A. ja Buynevich, I. V. 1998. Radar facies of paraglacial barrier system: coastal New England, USA. *Sedimentology* 45, 181-200.
- Hollolan Sora Oy, Rakennusbetoni ja Elementti Oy:n toimipiste Hollolassa. Vierailtu 25.2.2019.
- Hänninen, P. 1991. Maatutkaluotaus maaperägeologisessa tutkimuksessa. Geologian tutkimuskeskus. Tutkimusraportti 103. Espoo. 38 s.
- Igel, J., Gunther, T. ja Kuntzer, M. 2012. Ground-penetrating radar insight into a coastal aquifer: the freshwater lens of Borkum Island. *Hydrology and Earth System Sciences* 17, 519-531.
- Jacob, R. W. ja Urban, T. M. 2015. Ground-Penetrating Radar Velocity Determination and Precision Estimates Using Common-Mid-Point (CMP) Collection with Hand-Picking, Semblance Analysis, and Cross-Correlation Analysis: a Case Study and Tutorial for Archaeologists. *Archaeometry*. 19 s.
- Jol, H. M. 2008. *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Elsevier. 524 s.
- Eskelinen, A. 2003. Vuosaaren, Vartiokylän, Tattarisuon ja Kallahden pohjavesialueiden suojelusuunnitelma. Helsingin kaupunki, Uudenmaan ympäristökeskus. Helsinki. 37 s.
- Koskinen, M. ja Mikkola, J. 2007. Patolan nevan, Maununnevan, Slättmossenin ja Jollaksen rämeen ennallistamisselvitys. 26.3.2007. Opinnäytetyö, Maatalous- ja metsätieteellinen tiedekunta, Helsingin Yliopisto. 66.
- Malå. Guideline Geo. Sivulla vierailtu 2.12.2019. www.guidelinegeo.com/about/.
- Malå RTA-antenna manual. RTA-antennien esite. www.guidelinegeo.com/wp-content/uploads/2016/03/MALA-RTA-Antennas.pdf.
- Malå ProEx manual. Käyttöopas. www.guidelinegeo.com/wp-content/uploads/2016/07/MALA-ProEx-Control-Unit-Manual-v.2.0.pdf.
- Murray, T., Stuart, G. W., Fry, M., Gamble, N. H. ja Crabtree, M. D. 2000. Englacial water distribution in a temperate glacier from surface and borehole radar velocity analysis. *Journal of Glaciology*, 46, 389-398.
- Neal, A. 2004. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-Science Reviews* 66, 261-330.

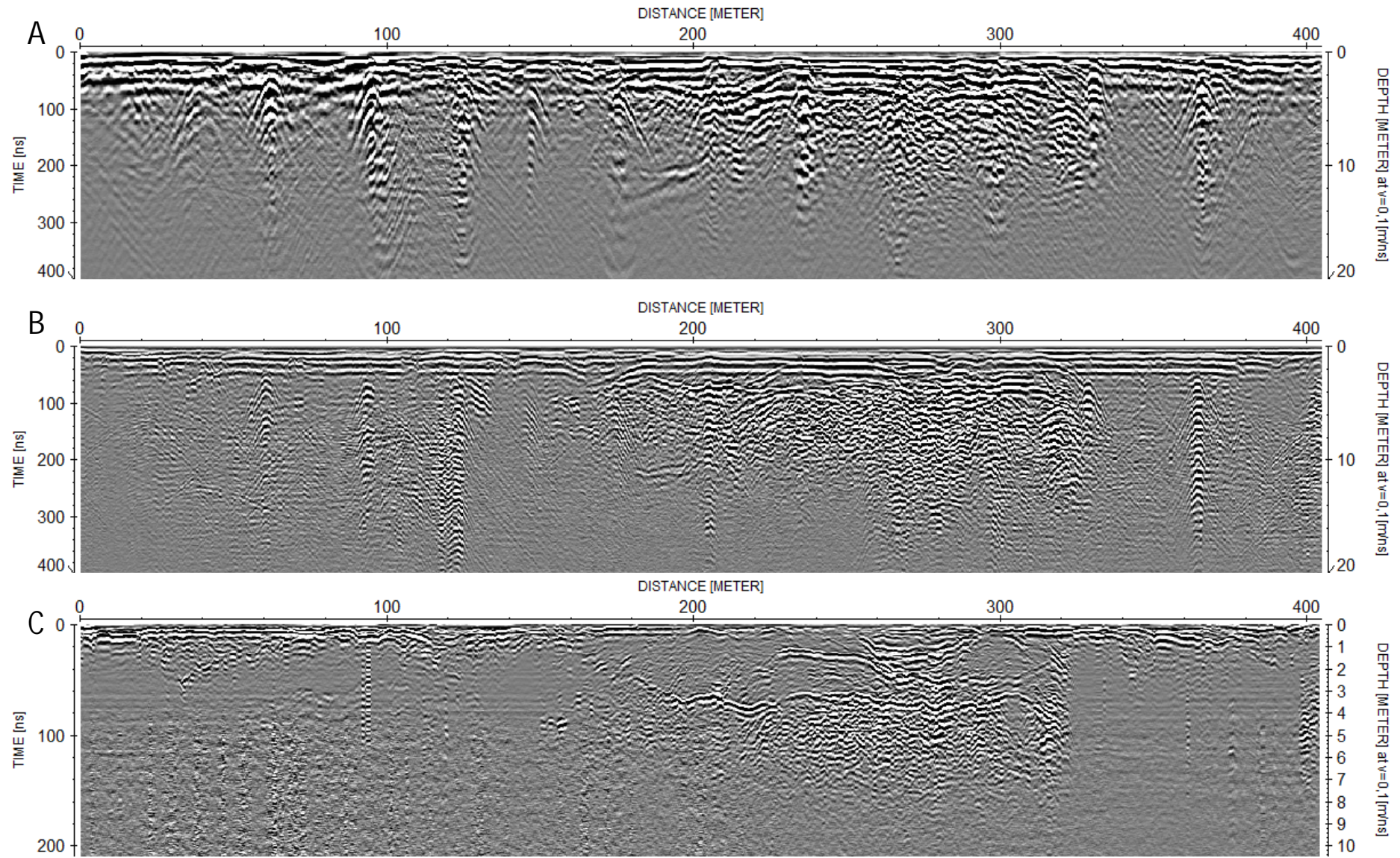
- Piilo, T. 1999. Pohjaveden pilaantumisriskit Helsingissä, Vuosaaren, Kallahden, Tattariharjun ja Vartiokylänlahden pohjavesialueet. Helsingin Kaupungin ympäristökeskuksen julkaisuja 9/99. Helsinki. 72 s.
- Reynolds, J. M. 1997. An introduction to applied and environmental geophysics. Wiley-Blackwell 2011 2nd edition. John Wiley & Sons. Chichester, UK. 696 s.
- Robinson, M., Bristow, C., McKinley, J. ja Ruffell, A. 2013. Ground Penetrating Radar. Geomorphological Techniques, Part 1, Sec. 5.5. British Society for Geomorphology. 26 s.
- Saarenketo, T. 2006. Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of ground penetrating radar in traffic infrastructure surveys. ACTA UNIVERSITATIS OULUENSIS, A Scientiae Rerum Naturalium 471. Oulun Yliopisto, Oulu. 125 s.
- Silvast, M. ja Wiljanen, B. 2008. ONKALO EDZ-Measurements Using Ground Penetrating Radar (GPR) Method. Working Report 2008-58. Roadscanners Oy. POSIVA OY. 33 s.
- Sutinen, H. 1997. Maatutkaluotaukset Loviisan Hästholmenin tutkimusalueella 1997. Geologian tutkimuskeskus. Työraportti 97-37. 133 s.
- Stern, W. 1930. Principles, methods and results of electrodynamic thickness measurement of glacier ice. Zeitschrift für Gletscherkunde 18. 24 s.
- SYKE avoin tieto. Oiva-tietokanta. Sivulla vierailtu 30.11.2019.
www.syke.fi/fi-FI/Avoin_tieto/Ymparistotietojarjestelmat
- Öster, H. 2006. Maatutka on monessa mukana. Geologian tutkimuskeskus. GeoFoorumi 2/2006. 17-19.

LITTEET

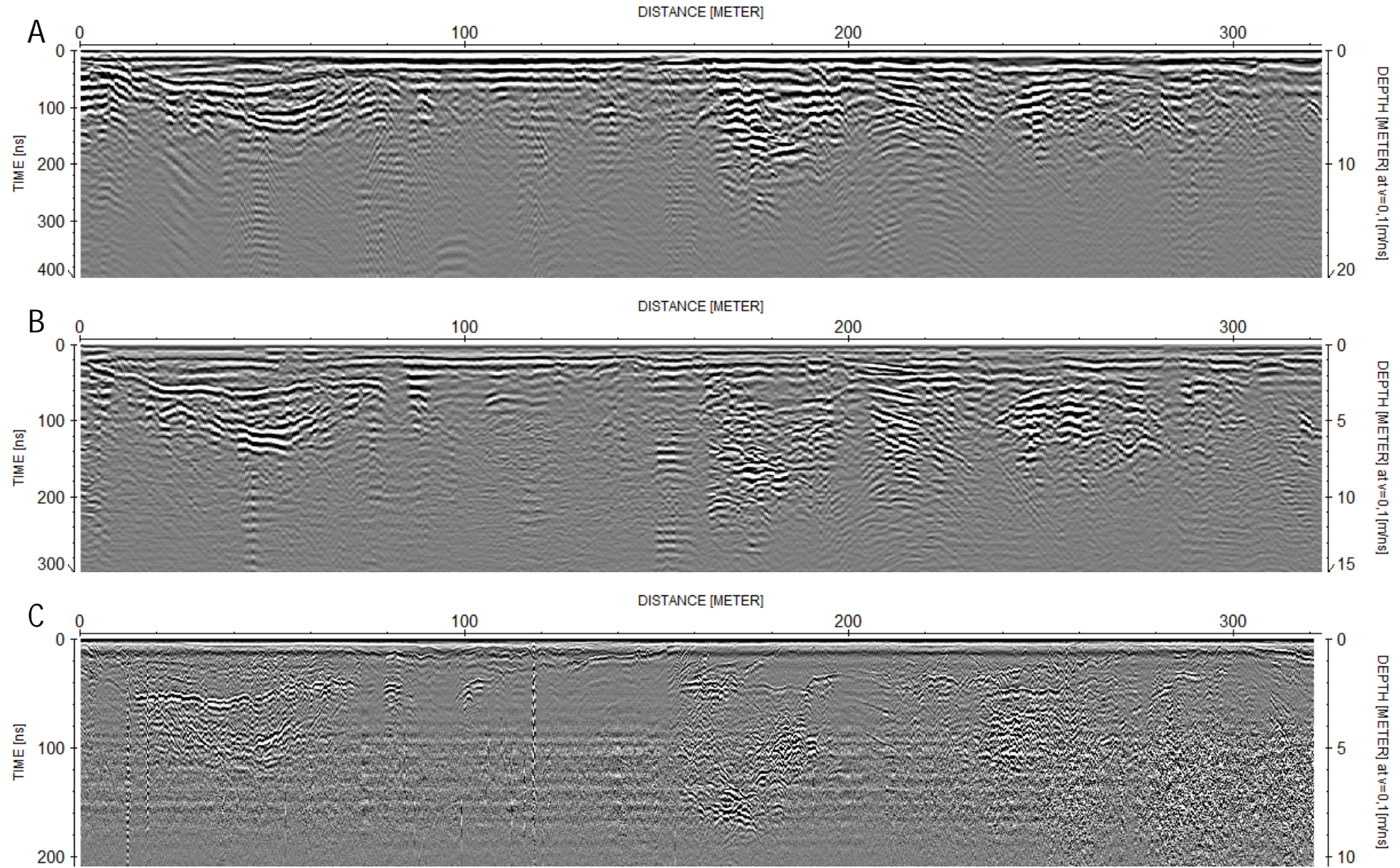
Liite 1. Patolan prosessoidut luotauslinjat. (A) 30 MHz:n luotauslinja. (B) 100 MHz:n luotauslinja. (C) 270 MHz:n luotauslinja.



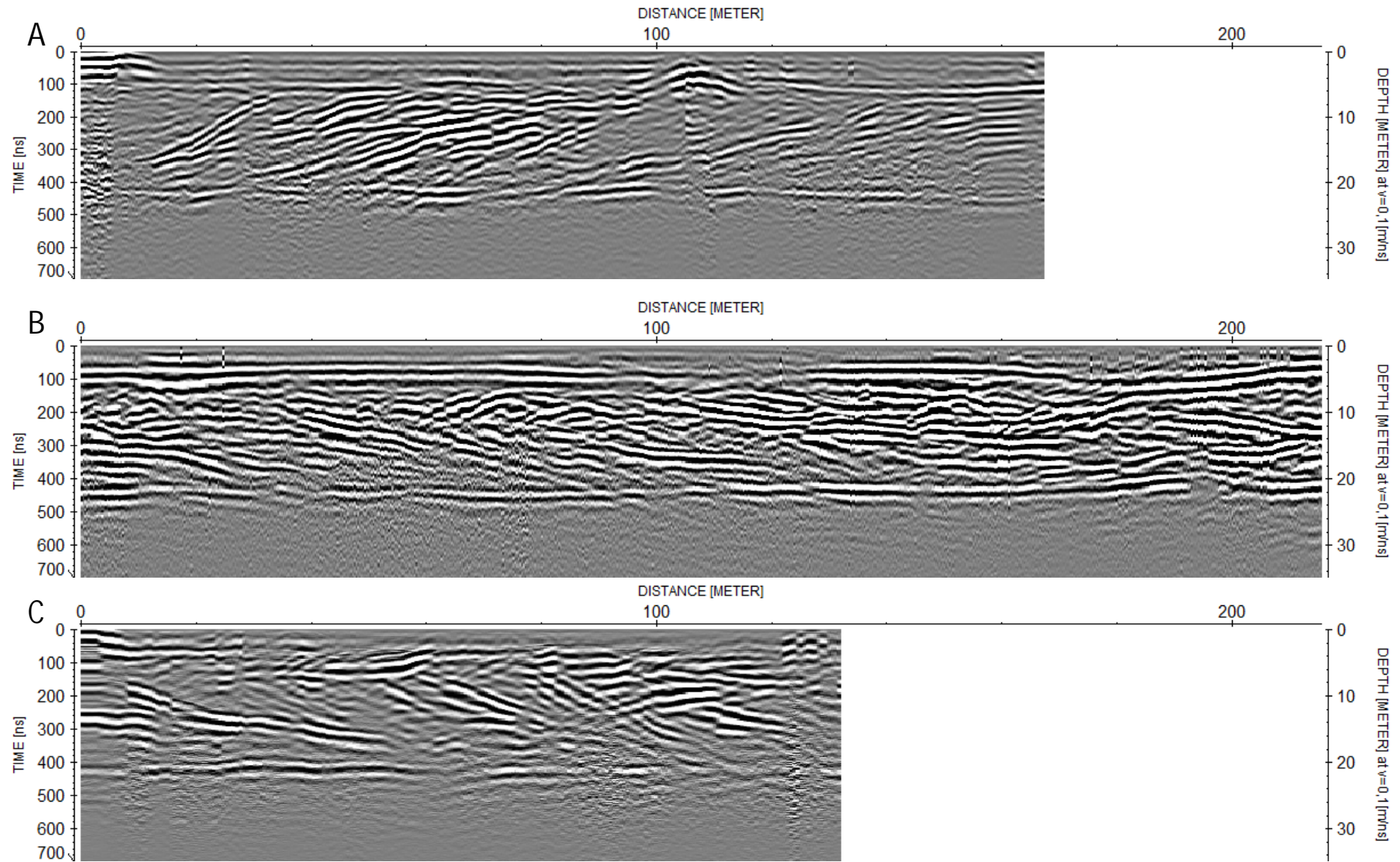
Liite 2. Tattarisuo linja 1 prosessoidut luotauslinjat. (A) 50 MHz:n luotauslinja. (B) 100 MHz:n luotauslinja. (C) 270 MHz:n luotauslinja.



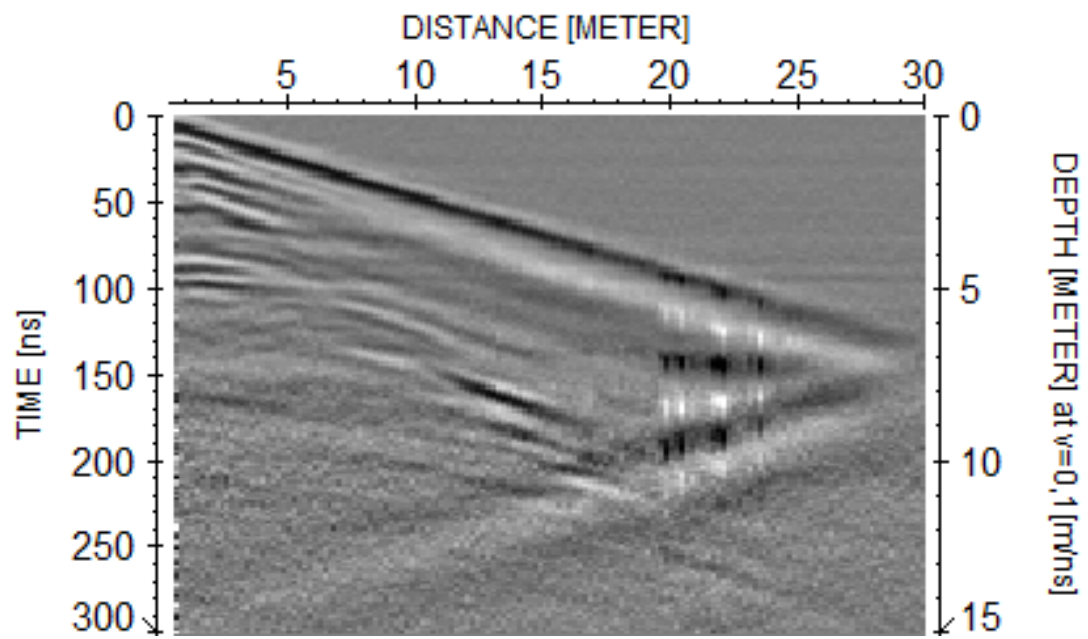
Liite 3. Tattarisuo linja 2 prosessoidut luotauslinjat. (A) 50 MHz:n luotauslinja. (B) 100 MHz:n luotauslinja. (C) 270 MHz:n luotauslinja.



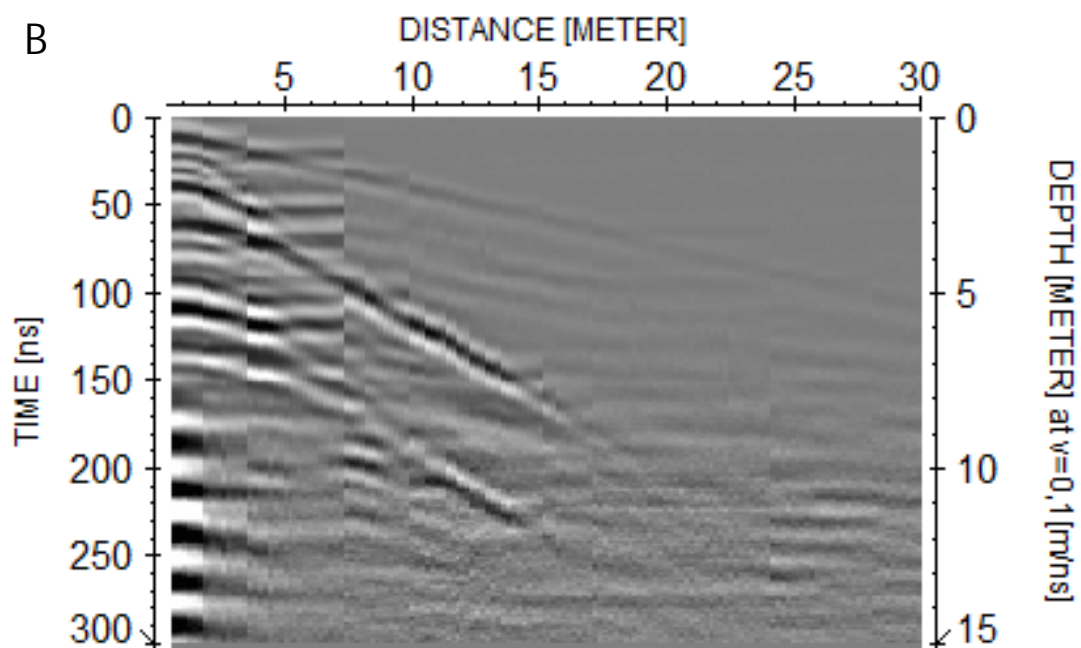
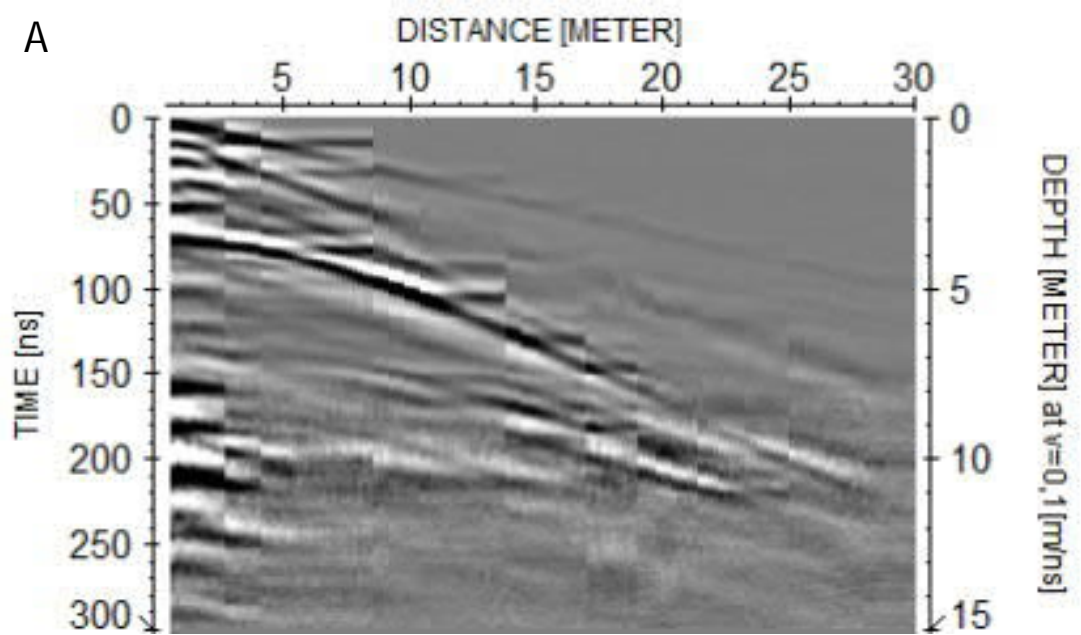
Liite 4. Hollolan prosessoidut 30 MHz:n luotauslinjat. (A) Luotauslinja 1. (B) Luotauslinja 2. (C) Luotauslinja 3.



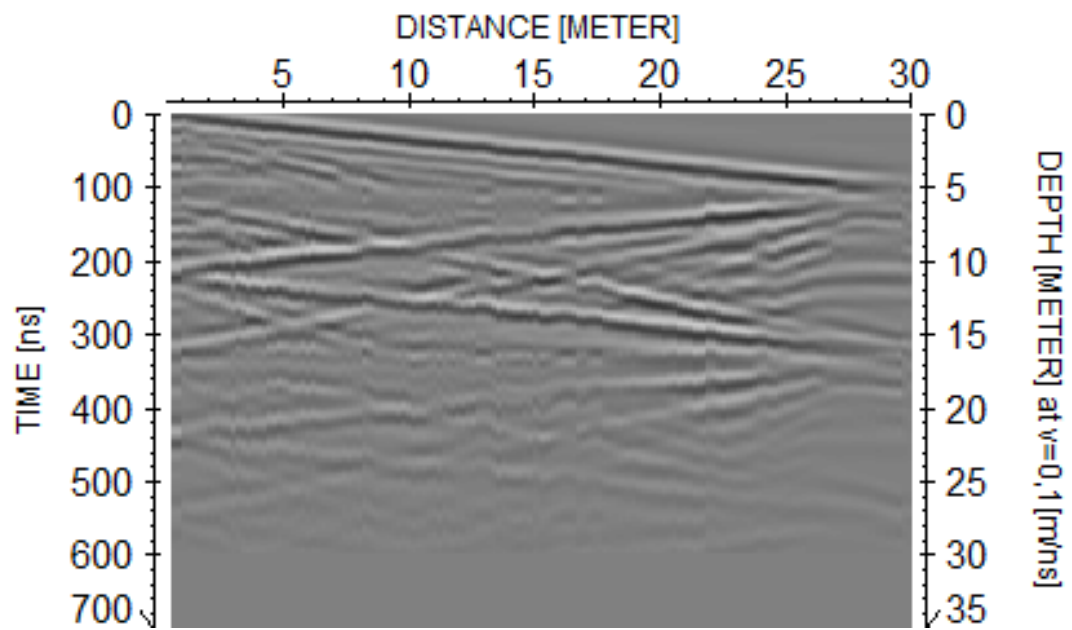
Liite 5. Patolan prosessoitu 80 MHz:n CMP-luotauslinja.



Liite 6. Tattarisuon prosessoidut 80 MHz:n CMP-luotauslinjat. (A) Luotauslinja 1. (B) Luotauslinja 2.



Liite 7. Hollolan prosessoitu 40 MHz:n CMP-luotauslinja.

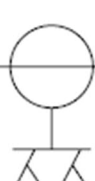


Liite 8. Patolan luotauslinjan referenssiaineistot (Helsingin kaupunki). (A) Referenssi 1 (278 m).
(B) Referenssi 2 (370 m). (C) Referenssi 3 (412 m)


A
v.1969

25497795
6680368
2.4
6.0

+39.3
+37.0
+33.3




+39.31
~kihkkht
~hkht
rako



B
v.1969

25497843
6680396
0.3
2.5

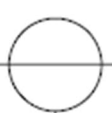


+38.5
+38.2
+36.0





+38.51
~kihkkht
rako

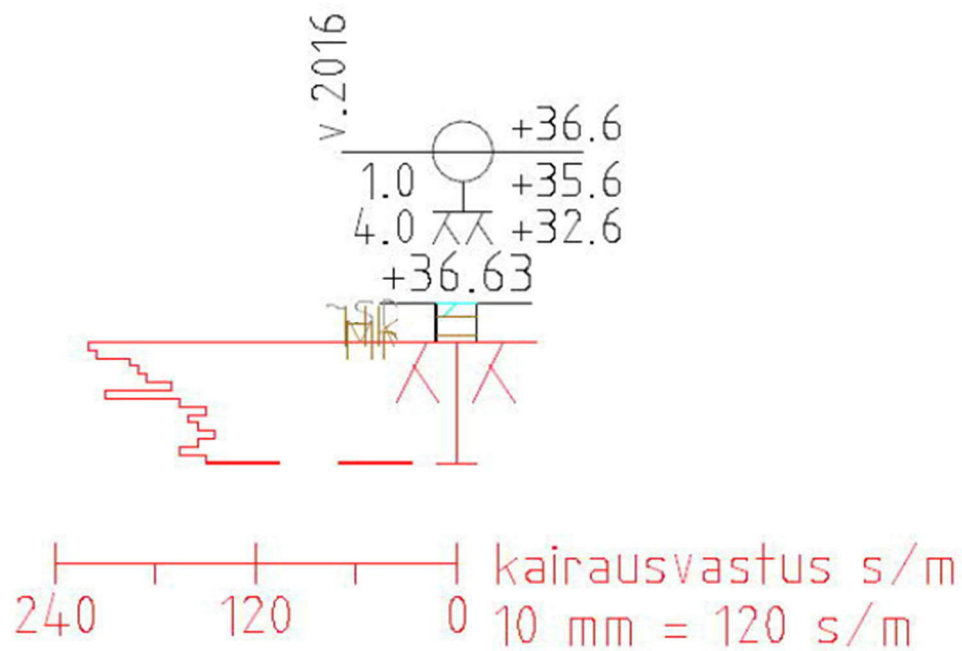
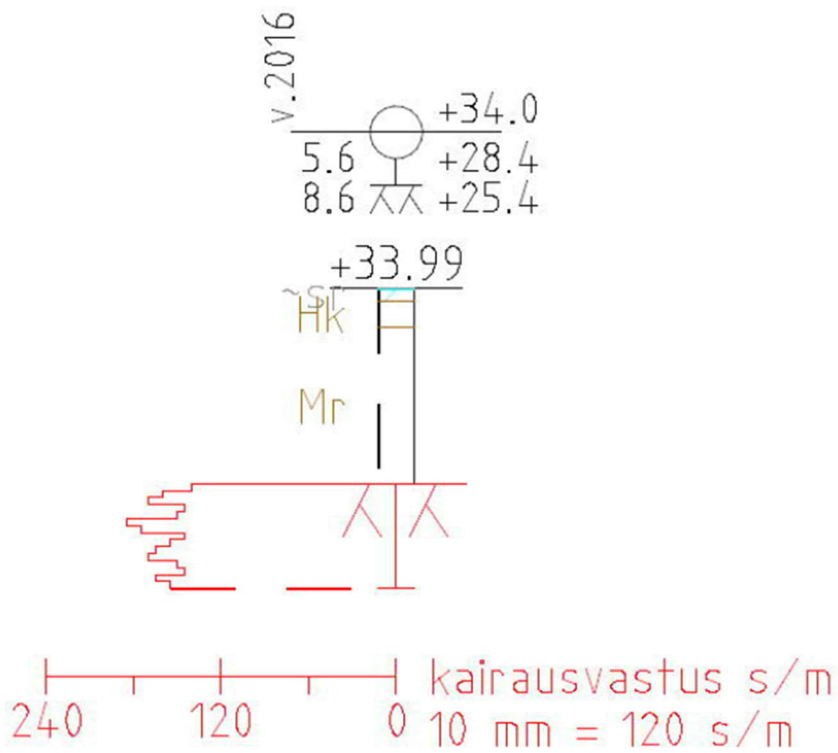


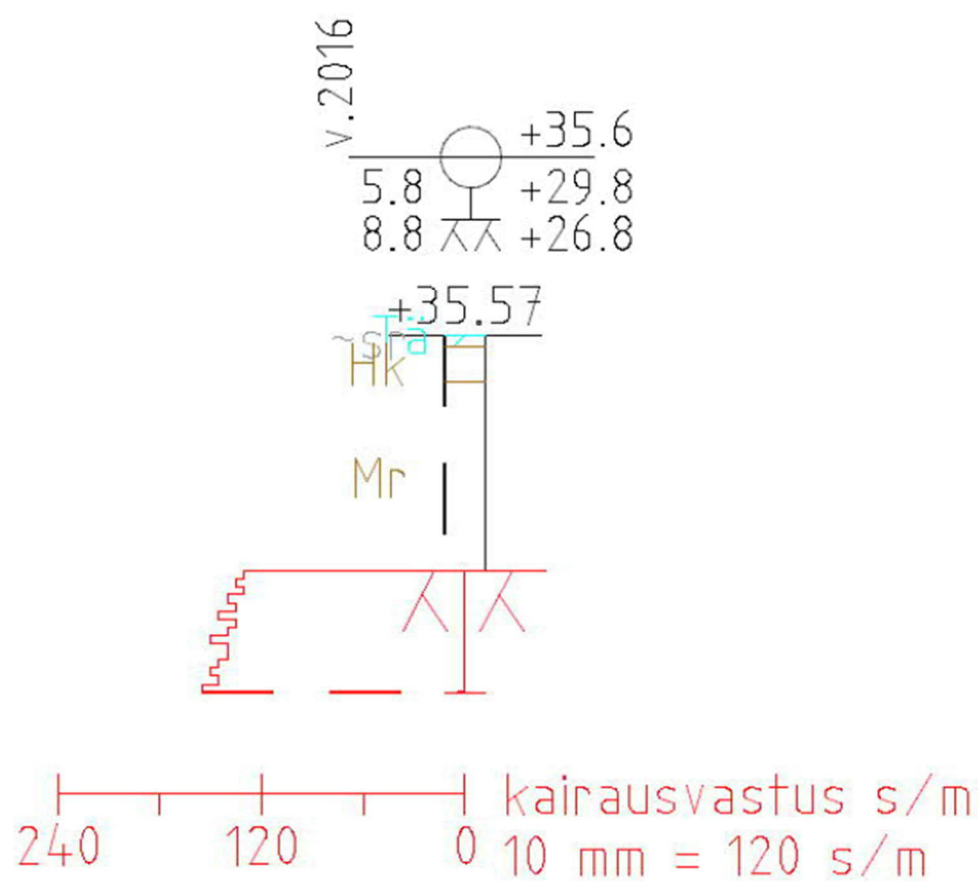
c
v.1969

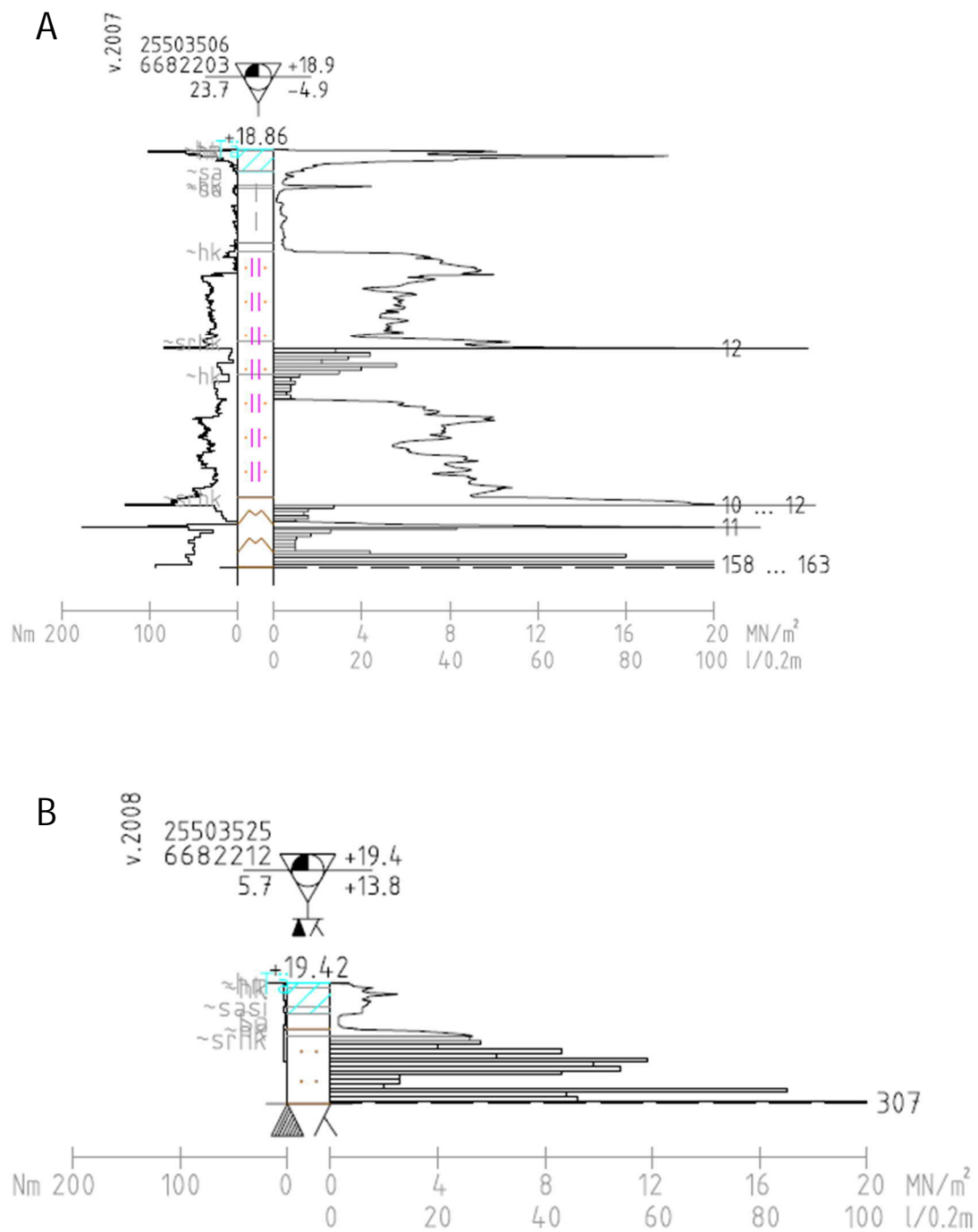
25497758		
6680389		+41.8
2.1		+39.7
4.1		+37.7

		+41.81
~kih		
~srlk		

Liite 9. Patolan täyttökerroksen arviointiin käytetyt referenssiaineistot (Helsingin kaupunki).

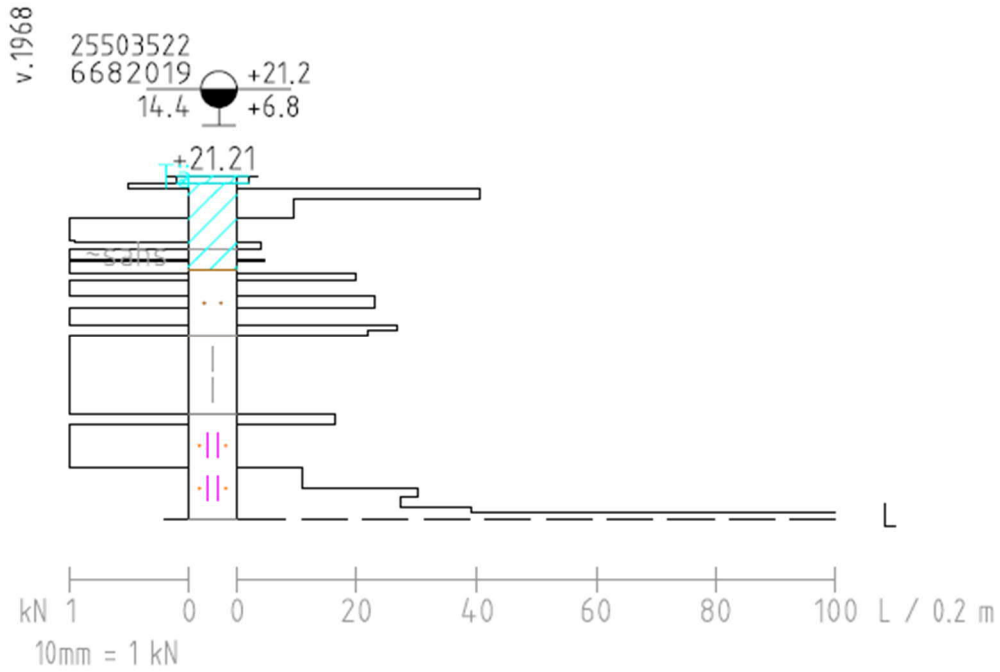




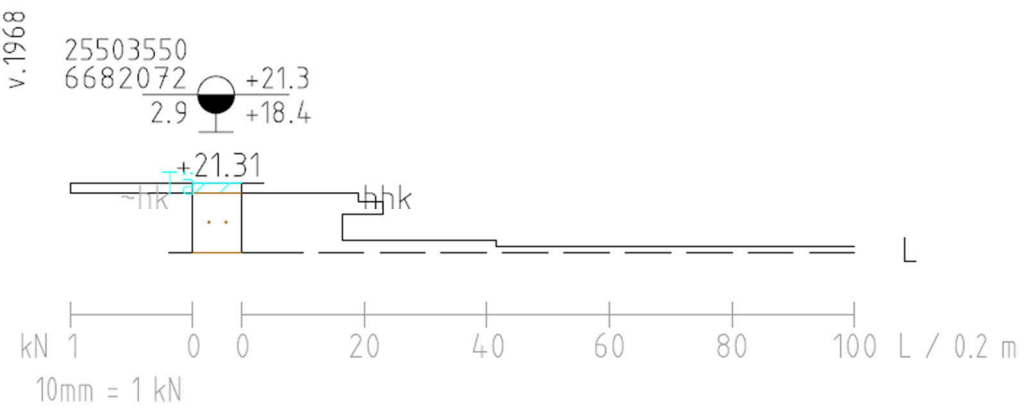


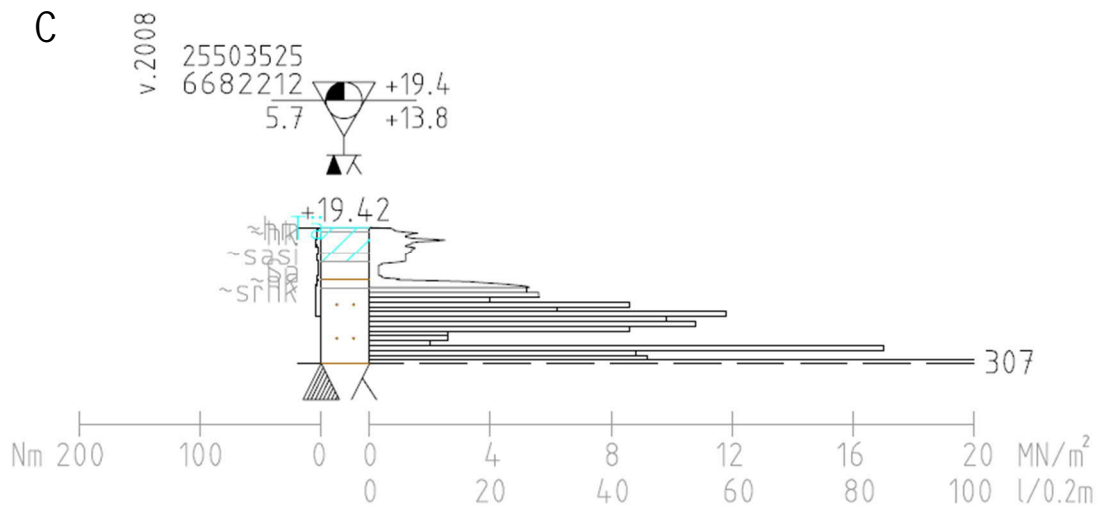
Liite 11. Tattarisuon luotauslinjan 2 referenssit (Helsingin kaupunki). (A) Referenssi 1 (40 m). (B) Referenssi 2 (100 m). (C) Referenssi 3 (306 m).

A

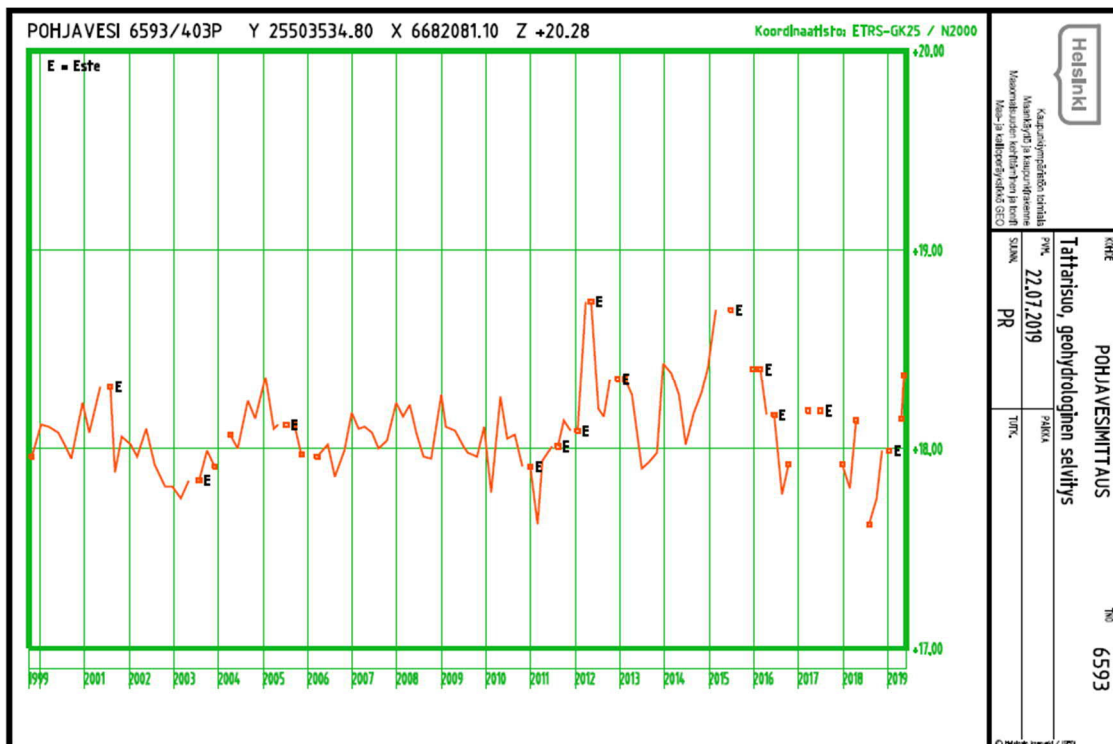


B

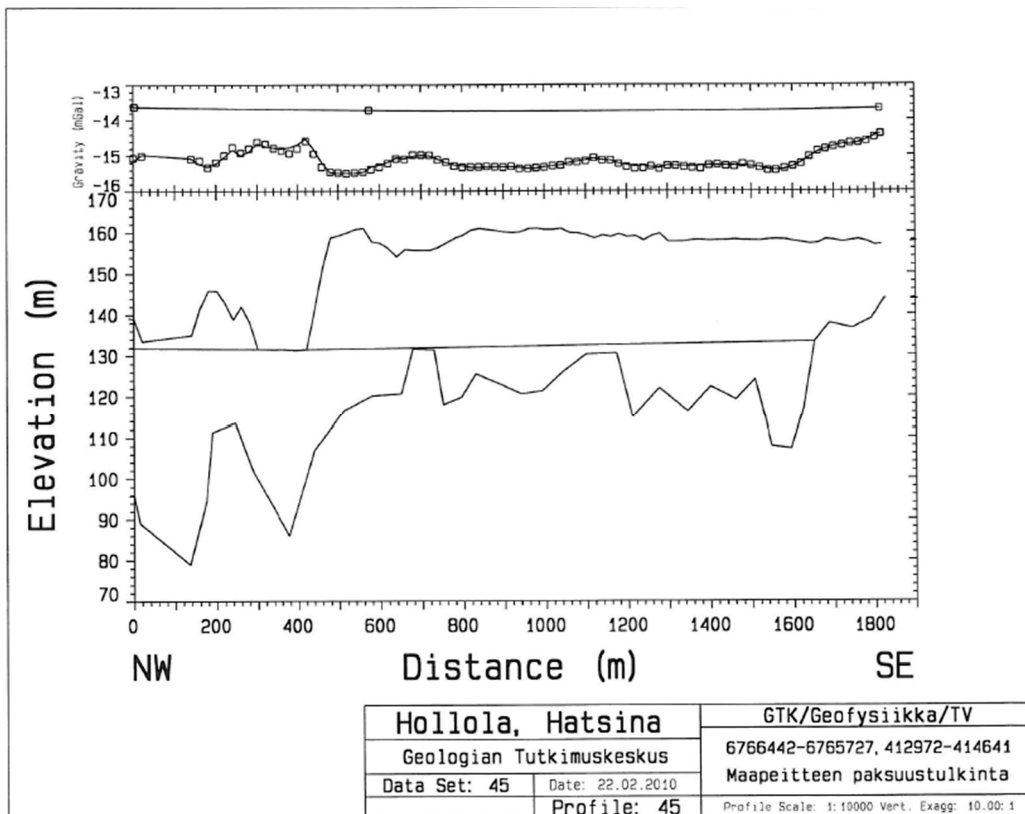
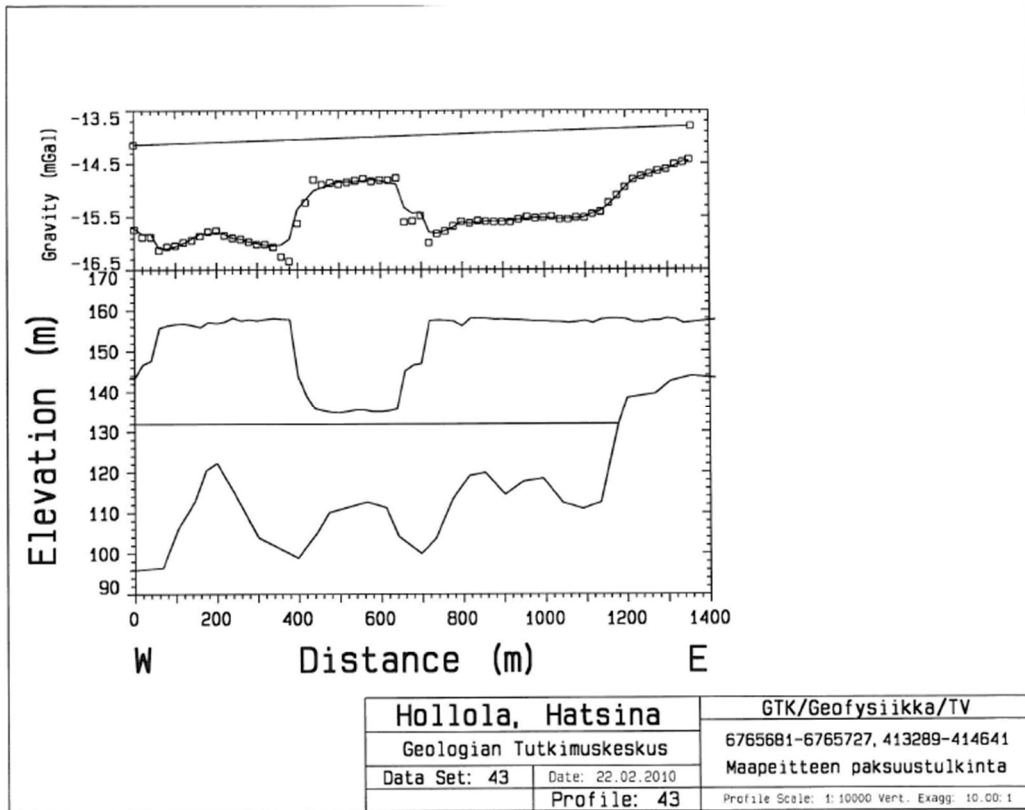


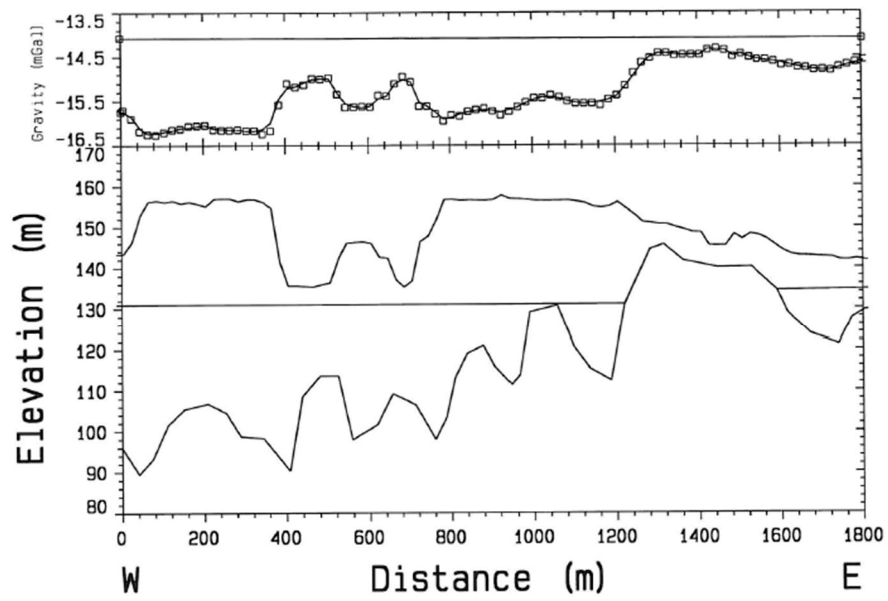


Liite 12. Tattarisuon pohjavedenpinnan taso (Helsingin kaupunki).



Liite 14. Hollolan painovoimamittausaineisto (Ahonen et al. 2011).





Hollola, Hatsina		GTK/Geofysiikka/TV	
Geologian Tutkimuskeskus		6765681-6765043, 413289-414978	
Data Set: 46	Date: 22.02.2010	Maapinnan paksuustulkinta	
	Profile: 46	Profile Scale: 1:10000 Vert. Exagg: 10.00:1	